

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Tomas GEČYS

PUSIAU STANDŽIŲ MAZGŲ  
IŠ MEDIENOS IR METALO  
ELGSENOS TYRIMAS IR  
MODELIAVIMAS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,  
STATYBOS INŽINERIJA (02T)



LEIDYKLA  
Vilnius TECHNIKA 2016

Disertacija rengta 2010–2016 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.  
Disertacija ginama eksternu.

### **Mokslinis konsultantas**

prof. dr. Alfonsas DANIŪNAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas,  
statybos inžinerija – 02T).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto Statybos inžinerijos mokslo krypties  
disertacijos gynimo taryba:

### **Pirmininkas**

prof. dr. Juozas VALIVONIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas,  
statybos inžinerija – 02T).

### **Nariai:**

prof. habil. dr. Gintautas DZEMYDA (Vilniaus universitetas, informatikos  
inžinerija – 07T),  
prof. habil. dr. Jonas Gediminas MARČIUKAITIS (Vilniaus Gedimino  
technikos universitetas, statybos inžinerija – 02T),  
prof. dr. Ainars PAEGLITIS (Rygos technikos universitetas, statybos  
inžinerija – 02T),  
doc. dr. Gintas ŠAUČIUVĖNAS (Vilniaus Gedimino technikos  
universitetas, statybos inžinerija – 02T).

Disertacija bus ginama viešame Statybos inžinerijos mokslo krypties disertacijos  
gynimo tarybos posėdyje **2016 m. balandžio 21 d. 14 val.** Vilniaus Gedimino  
technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel.: (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112; el. paštas doktor@vgtu.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2016 m. kovo 18 d.

Disertaciją galima peržiūrėti VGTU talpykloje <http://dspace.vgtu.lt/> ir Vilniaus  
Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223  
Vilnius, Lietuva).

VGTU leidyklos TECHNIKA 2360-M mokslo literatūros knyga  
<http://leidykla.vgtu.lt>

ISBN 978-609-457-888-5

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2016

© Tomas Gečys, 2016

[tomas.gecys@vgtu.lt](mailto:tomas.gecys@vgtu.lt)

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Tomas GEČYS

BEHAVIOUR INVESTIGATION  
AND MODELLING OF THE  
SEMI-RIGID TIMBER-STEEL  
CONNECTIONS

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,  
CIVIL ENGINEERING (02T)



LEIDYKLA  
Vilnius TECHNIKA 2016

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2010–2016.

The dissertation is defended as an external work.

### **Scientific Consultant**

Prof. Dr Alfonsas DANIŪNAS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – 02T).

The Dissertation Defence Council of Scientific Field of Civil Engineering of Vilnius Gediminas Technical University:

### **Chairman**

Prof. Dr Juozas VALIVONIS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – 02T).

### **Members:**

Prof. Dr Habil. Gintautas DZEMYDA (Vilnius University, Informatics Engineering – 07T),

Prof. Dr Habil. Jonas Gediminas MARČIUKAITIS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – 02T),

Prof. Dr Ainars PAEGLITIS (Riga Technical University, Civil Engineering – 02T),

Assoc. Prof. Dr Gintas ŠAUČIUVĖNAS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – 02T).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defence Council of Civil Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **2 p. m. on 21 April 2016**.

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112; e-mail: doktor@vgtu.lt

A notification on the intend defending of the dissertation was send on 18 March 2016.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at the VGTU repository <http://dspace.vgtu.lt/> and at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

# Reziumė

Disertaciniame darbe analizuojamas inovatyvios konstrukcijos pusiau standus mazgas, pagamintas iš klijuotosios medienos ir metalo, skirtas sijinių elementų tarpusavio jungčiai. Pagrindinis darbo tikslas – tai komponentų metodo pritaikymas analizuojamo pusiau standaus mazgo lenkiamosios galios ir sukamojo standžio skaičiavimuose. Pristatomas komponentų metodas yra išvestas remiantis plieninių konstrukcijų jungtims pateikiama metodika. Atskirų mazgo komponentų stiprio ir standžio išraiškos gaunamos modeliuojant jungtį tūriniais baigtiniais elementais bei atliekant konstrukcinių matmenų jungties eksperimentinius tyrimus.

Disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai, bendrosios išvados, literatūros sąrašas, autoriaus publikacijų sąrašas disertacijos tema ir santrauka anglų kalba. Įvade aptariama tiriamoji problema, darbo aktualumas, tyrimo objektas. Suformuojami darbo tikslai bei uždaviniai, pateikiama tyrimų metodika, aptariamas darbo mokslinis naujumas ir pasiektų rezultatų praktinė reikšmė, pristatomi gynamieji teiginiai. Įvado pabaigoje pristatomos autoriaus paskelbtos mokslinės publikacijos, pranešimai konferencijose ir pateikiama disertacijos struktūra.

Pirmame skyriuje pateikiama kitų autorių mokslinės literatūros analizė tiriamu klausimu bei pristatomas tiriamas pusiau standus mazgas, pagamintas iš klijuotosios sluoksninės medienos ir metalo.

Antrame skyriuje pristatomi atlikti konstrukcinių matmenų analizuojamos jungties eksperimentiniai tyrimai. Aptariami galimi eksperimentiniai irties pobūdžiai, pateikiamos eksperimentinės lenkiamosios galios bei sukamieji standžiai.

Trečiame skyriuje pateikiama mazgo skaitinė analizė naudojant baigtinių elementų metodą. Pateikiamas detalus jungties skaitinio modelio aprašymas ir atliekama parametrinė mazgo analizė, nustatanti atskirų parametrų poveikį bendrai mazgo lenkiamajai galiai ir sukamajam standžiui.

Ketvirtame skyriuje pateikiamas komponentų metodo pritaikymas pusiau standaus mazgo, pagaminto iš medienos ir metalo, lenkiamosios galios ir sukamojo standžio skaičiavimuose. Pateikiamos kai kurių naujai siūlomų komponentų laikomosios galios ir standžio koeficientų išraiškos. Pristatomi parametrinės analizės rezultatai, gauti keičiant analizuojamo mazgo matmenis.

Disertacijos tema paskelbti 8 moksliniai straipsniai, iš kurių du *ISI Web of Science* leidiniuose, turinčiuose citavimo indeksą; vienas *ISI proceedings* tarptautinės konferencijos medžiagoje; vienas recenzuojamoje užsienio tarptautinės konferencijos medžiagoje; trys straipsniai kitų tarptautinių duomenų bazių leidiniuose bei vienas straipsnis recenzuojamoje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos medžiagoje.

# Abstract

An innovative semi-rigid timber-steel connection, which is used for beam-to-beam connection, is investigated in the present dissertation. The aim of the dissertation is the implementation of the component method for the theoretical calculations of moment resistance and rotational stiffness of the semi-rigid timber-steel connection. The presented component method algorithm is developed based on the component method used for calculations of semi-rigid steel connections. Resistance and stiffness coefficient of each component is developed from the finite element modelling and experimental investigation results.

The dissertation consists of introduction, four chapters, general conclusions and recommendations, the list of references, the list of scientific publications by the author on the topic of the dissertation and summary in English.

The introduction reveals the investigated problem, importance of the thesis and the object of research. Tasks and aims are formulated; research methodology, scientific novelty, practical value of results, defended propositions and the scope of the scientific work are presented. The introduction ends in presenting the author's publications and conference presentations on the subject of the defended dissertation and defining the structure of the dissertation.

Chapter 1 presents the previous scientific investigations by other authors and the structure of investigated semi-rigid timber-steel connection is described further.

Chapter 2 reveals the performed natural laboratory experiments of the analysed connection. The expected laboratory failure modes of the connection are described, also the moment resistances and rotational stiffness values are given.

The finite element analysis of the connection is presented in the chapter 3. The detailed explanation of the 3D finite element model is presented. The parametric analysis is performed with an aim to determine the influence of different parameters on the moment resistance and rotational stiffness.

Chapter 4 presents the developed component method for the analysed semi rigid timber-steel connection in terms on theoretical determination of moment resistance and rotational stiffness. Some expressions of the bearing capacity and stiffness coefficients are developed for the newly presented components in the connection. Chapter 4 ends with a detailed geometrical parameter analysis of the connection using the presented component method.

8 scientific articles were published on the topic of the dissertation: two – in scientific journals included in the *Thomson Reuters Web of Knowledge (ISI Web of Science)*, one – in the *ISI Proceedings*, one – in other proceedings of international conferences, three – in other databases and one – in the Lithuanian conference proceedings.

---

# Žymėjimai

## Simboliai

$EI / L$  – elemento santykinis standumas;

$E_{c,0}$  – gniuždomasis medienos tamprumo modulis išilgai pluošto;

$E_{c,90}$  – medienos tamprumo modulis skersai pluošto;

$E_{CEM}$  – cementinio užpildo tamprumo modulis;

$E_L$ ,  $E_R$ ,  $E_T$  – medienos tamprumo modulis atitinkamai išilgai pluošto, radialine ir tangentine kryptimis;

$E_{PUR}$  – poliuretaninio užpildo tamprumo modulis;

$E_s$  – plieno tamprumo modulis;

$f_{c,0}$  – gniuždomasis medienos stipris išilgai pluošto;

$f_{c,0,CEM}$  – medienos gniuždomasis stipris bandiniuose su cementiniu užpildu;

$f_{c,0,PUR}$  – medienos gniuždomasis stipris bandiniuose su poliuretaniniu užpildu;

$f_{c,CEM}$  – cementinio užpildo gniuždomasis stipris;

$f_{c,PUR}$  – poliuretano pagrindo užpildo gniuždomasis stipris;

$F_{est}$  – prognozuojama ardančioji apkrova;

$f_{t,90}$  – tempiamasis stipris statmenai medienos pluoštui;

$F_{tr,Rd}$  – efektyvioji skaičiuotinė  $r$  varžtų eilės tempiamoji galia;

$f_v$  – šlyjamasis medienos stipris lygiagrečiai medienos pluoštui;

$f_{v,90}$  – šlyjamasis medienos stipris statmenoje medienos pluoštui plokštumoje;

$h_r$  – varžtų eilės  $r$  atstumas iki gniuždymo centro;

$h_v$  – medienos šlyties plokštumos aukštis;

$k_{B,T}$  – tempimo veikiamo medienoje įklijuotojo strypo standžio koeficientas;  
 $k_{bt}$  – tempimo veikiamų varžtų jungties tempiamojoje zonoje standžio koeficientas;  
 $k_{eff,r}$  –  $r$  varžtų eilės efektyvusis standžio koeficientas;  
 $k_{epb}$  – lenkimo veikiamos galinės plokštelės jungties tempiamojoje zonoje standžio koeficientas;  
 $k_{epc}$  – lenkimo dėl gniuždymo veikiamos galinės T pavidalo inkaruojamos plokštelės, apimant ir medienos gniuždymą, jungties gniuždomojoje zonoje standžio koeficientas;  
 $k_{ept}$  – lenkimo dėl tempimo veikiamos galinės T pavidalo inkaruojamos plokštelės, apimant ir medienos gniuždymą, jungties tempiamojoje zonoje standžio koeficientas;  
 $k_{eq}$  – lygiavertis standžio koeficientas;  
 $K_{nn}, K_{ss}, K_{tt}$  – plokštumos standumo koeficientai atitinkamai  $nn, ss, tt$  linkmėmis;  
 $k_{spc}$  – gniuždymo veikiamos išilginės plokštelės jungties gniuždomojoje zonoje standžio koeficientas;  
 $k_{spt}$  – tempimo veikiamos išilginės plieninės plokštelės jungties tempiamojoje zonoje standžio koeficientas;  
 $k_{T,C}$  – kampu gniuždomos medienos standžio koeficientas;  
 $k_{tt}$  – tempimo veikiamos medienos jungties tempiamojoje zonoje standžio koeficientas;  
 $l_a$  – strypo įklįjavimo medienoje ilgis;  
 $L_v$  – medienos šlyties plokštumos ilgis;  
 $M$  – lenkiamasis momentas;  
 $M_{full-strength}$  – prijungiamo elemento laikomoji galia;  
 $M_{j,R,exp}$  – eksperimentinė mazgo laikomoji galia;  
 $M_{j,R,FEM}$  – modeliavimu baigtiniais elementais nustatyta mazgo laikomoji galia;  
 $M_{j,R,komp}$  – komponentų metodu nustatyta mazgo laikomoji galia;  
 $M_{j,Rd}$  – skaičiuotinė mazgo laikomoji galia;  
 $r$  – varžtų eilės numeris;  
 $S_j$  – mazgo sukamasis standis;  
 $S_{j,ini}$  – pradinis mazgo sukamasis standis;  
 $S_{j,ini,exp}$  – eksperimentinis pradinis mazgo sukamasis standis;  
 $S_{j,ini,FEM}$  – modeliavimu baigtiniais elementais nustatytas pradinis mazgo sukamasis standis;  
 $S_{j,ini,komp}$  – komponentų metodu nustatytas pradinis mazgo sukamasis standis;  
 $u$  – mazgo vertikalus poslinkis;  
 $u_c$  – gniuždomosios deformacijos medienos ir metalo sąlyčio srityje;  
 $u_T$  – tempiamosios deformacijos medienos ir metalo sąlyčio srityje;  
 $w$  – medienos drėgnis;



$z_{eq}$  – lygiavertis petys;

$\mu$  – trinties koeficientas; standžio santykis;

$\rho$  – medienos tankis;

$\sigma_{ij}$  – medienoje veikiantys įtempiai  $ij$  linkme;

$\sigma_{t,90}$  – tempimo statmenai medienos pluoštui veikiantys įtempiai;

$\bar{\sigma}_{ij}$  – medienos takumo įtempių reikšmė  $ij$  linkme;

$\tau_v$  – lygiagrečiai medienos pluoštui veikiantys šlyties įtempiai;

$\tau_{v,90}$  – šlyties įtempiai, veikiantys statmenoje medienos pluoštui plokštumoje;

$\phi$  – mazgo pasisukimo kampas;

$\psi$  – jungties tipo koeficientas.

## Santrumpos

CEM – cementinis užpildas;

DS – didesnis stipris;

KV – konstrukciniai varžtai;

MS – mažesnis stipris;

PUR – poliuretano užpildas.



---

# Turinys

IVADAS .....	1
Problemos formulavimas .....	1
Darbo aktualumas .....	2
Tyrimo objektas .....	3
Darbo tikslas .....	3
Darbo uždaviniai .....	3
Tyrimų metodika .....	4
Darbo mokslinis naujumas .....	4
Darbo rezultatų praktinė reikšmė .....	5
Ginamieji teiginiai .....	5
Darbo rezultatų aprobavimas .....	6
Disertacijos struktūra .....	6
1. PUSIAU STANDŽIŲ MAZGŲ IŠ MEDIENOS IR METALO KONSTRAVIMO PRINCIPAI, ANALIZĖS METODAI IR TYRIMO OBJEKTAS .....	7
1.1. Mazgų, pagamintų iš medienos ir metalo, klasifikavimas pagal stiprumą ir standumą .....	7
1.2. Pusiau standžių mazgų, pagamintų iš medienos ir metalo, konstravimo principai	11
1.3. Tolimesniems tyrimams siūlomo inovatyvaus mazgo iš medienos ir metalo konstrukcija .....	16
1.4. Pusiau standžių mazgų iš medienos ir metalo analizės metodai ir ankstesnių tyrimų apžvalga .....	18
1.4.1. Eksperimentiniai tyrimai .....	18

1.4.2. Modeliavimas baigtinių elementų metodu .....	20
1.4.3. Komponentų metodas .....	21
1.5. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas .....	24
2. MAZGŲ IŠ MEDIENOS IR METALO EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI .....	27
2.1. Eksperimentiniai bandymai statine apkrova .....	27
2.2. Bandiniai ir naudojamos medžiagos .....	28
2.3. Eksperimentinių bandymų metodika .....	31
2.4. Eksperimentinių tyrimų rezultatai .....	34
2.4.1. Mazgo sukamieji standžiai, lenkiamoji galia, įtempių medienoje reikšmės .....	35
2.4.2. Bandinių irties pobūdžiai .....	41
2.4.3. Medienos fizinės ir mechaninės savybės .....	42
2.5. Antrojo skyriaus išvados .....	45
3. PUSIAU STANDAUS MAZGO SKAITINĖ ANALIZĖ .....	47
3.1. Tiriamo mazgo analizės modelis naudojant programinį paketą ABAQUS .....	47
3.2. Mazgų modeliavimo baigtinių elementų programiniu paketu rezultatai bei jų validumas .....	56
3.3. Trečiojo skyriaus išvados .....	70
4. PUSIAU STANDAUS MAZGO IŠ MEDIENOS IR METALO STIPRIO IR STANDŽIO MODELIAVIMAS KOMPONENTŲ METODU .....	71
4.1. Bendrosios sąvokos bei aktyviųjų standžio ir stiprio komponentų išskyrimas .....	71
4.2. Mazgo lenkiamosios galios nustatymas .....	74
4.3. Mazgo komponentų laikomosios galios .....	77
4.4. Mazgo sukamojo standžio skaičiavimas .....	83
4.5. Mazgo komponentų standžio koeficientų išraiškos .....	85
4.6. Analizuojamo mazgo skaičiavimų komponentų metodu rezultatai ir jų palyginimas su eksperimentiniais tyrimais bei skaitine analize .....	88
4.7. Komponentų metodo pritaikymas skirtingų matmenų mazgų skaičiavimuose .....	91
4.8. Ketvirtąjo skyriaus išvados .....	98
BENDROSIOS IŠVADOS .....	101
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI .....	103
AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS ....	113
SUMMARY IN ENGLISH .....	115
PRIEDAI *	133
A priedas. Bendraautorių sutikimai teikti publikacijose skelbtą medžiagą mokslo daktaro disertacijoje .....	134
B priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos .....	146

---

\* Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje

---

# Contents

INTRODUCTION .....	1
Formulation of the problem.....	1
Relevance of the thesis .....	2
The object of the research .....	3
The aim of the thesis .....	3
The objectives of the thesis .....	3
The research methodology .....	4
Scientific novelty of the thesis .....	4
Practical value of the research findings.....	5
Defended statements .....	5
The approval of the research findings .....	6
The structure of the dissertation .....	6
 1. DESIGN PRINCIPLES OF SEMI-RIGID TIMBER-STEEL CONNECTIONS, METHODS OF ANALYSIS AND RESERCH OBJECT .....	7
1.1. Classification of timber-steel connections according to strength and stiffness ...	7
1.2. Design principles of semi-rigid timber-steel connections .....	11
1.3. Structure of the further investigated semi-rigid timber-steel connection .....	16
1.4. Analysis methods of semi-rigid timber-steel connections and review of the previous investigations .....	18
1.4.1. Laboratory experiments .....	18
1.4.2. Finite element modelling .....	20
1.4.3 Component method .....	21
1.5. Conclusions of the first chapter and the formulation of the objectives of the thesis .....	24
 2. LABORATORY EXPERIMENTS OF TIMBER-STEEL CONNECTIONS.....	27
2.1. Experiments using the static loading .....	27

2.2. Total quantity of laboratory experiments and used materials .....	28
2.3. Experimental program .....	31
2.4. Results of laboratory experiments .....	34
2.4.1. Rotational stiffness, bending bearing capacities and normal stresses in timber .....	35
2.4.2. Failure modes .....	41
2.4.3. Physical and mechanical properties of the timber .....	42
2.5. Conclusions of the second chapter .....	45
3. FINITE ELEMENT ANALYSIS OF THE SEMI-RIGID CONNECTION .....	47
3.1. Finite element model of the connection using the software ABAQUS .....	47
3.2. Finite element modelling results and its validity .....	56
3.3. Conclusions of the third chapter .....	70
4. MODELLING OF STRENGTH AND STIFFNESS OF SEMI-RIGID TIMBER- STEEL CONNECTION USING THE COMPONENT METHOD .....	71
4.1. General concepts and active components of strength and stiffness .....	71
4.2. Moment resistance determination of the connection .....	74
4.3. Resistances of the components .....	77
4.4. Rotational stiffness determination of the connection .....	83
4.5. Stiffness coefficients of the components .....	85
4.6. Component method calculation results and its comparison with experimental and finite element modelling results .....	88
4.7. Implementation of the component method for the practical calculations .....	91
4.8. Conclusions of the fourth chapter .....	98
GENERAL CONCLUSIONS .....	101
REFERENCES .....	103
THE LIST OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS BY THE AUTHOR ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION .....	113
SUMMARY IN ENGLISH .....	115
ANNEXES* .....	133
Annex A. The co-authors agreements to present publications in the dissertation ..	134
Annex B. Copies of the author scientific publications on the topic of the dissertation..	146

---

\* The annexes are supplied in the enclosed compact disc

---

# Įvadas

## Problemos formulavimas

Klijuotosios medienos konstrukcijų gamyboje bei projektavime vienas sudėtingiausių etapų yra jungčių tarp atskirų elementų konstravimas ir įrengimas. Paprastai medinių elementų jungtys įrengiamos panaudojant plienines jungiamąsias plokšteles ar virintinas detales. Šios jungtys naudojamos atskirų elementų sujungimui į vientisus elementus statybvietėje. Klijuotosios medienos konstrukcijų gamybos galimybės yra labai plačios: tiesios ašies elementai gali būti suklijuojami iki 40 m ilgio, o lenktos ašies elementų gabaritiniai matmenys dar didesni, tad jungtys tarp atskirų elemento dalių yra neišvengiamos. Atlikus pasaulyje naudojamų pusiau standžių mazgų, pagamintų iš medienos ir metalo, analizę, gali būti išskiriami 4 jungčių konstravimo principai. 1-asis tai klasikinės jungtys, įrengiamos panaudojant plienines plokšteles ar virintinas detales bei varžtus ar kaiščius. 2-asis – įklijuotųjų plieninių strypų panaudojimas plieninei virintinai detalei medienoje inkaruoti; vietoje įklijuotųjų plieninių strypų taip pat gali būti panaudojami kampu medienos pluoštui įsriegiami medšraigčiai. 3-asis – tai jungtys, kuriose panaudojami kietmedžio ar metaliniai pleištai glaudžiai sąveikai tarp medienos ir plieninės detalės užtikrinti. 4-asis – tai didelio skersmens inkarinių strypų, kurie tvirtinami medienoje panaudojant kaiščius, panaudojimas. Disertaciniame darbe tiriamas mazgas priskiriamas 3-ajai grupei, tai yra įren-

giamas panaudojant virintinas detales bei užpildą glaudžiai sąveikai tarp medienos ir metalo užtikrinti.

Beveik visos, išskyrus klijuotinas, medinių konstrukcijų jungtys gali būti traktuojamos kaip pusiau standžios, tai yra turinčios tam tikrą sukamąjį standį. Pusiau standžios jungtys medinėse konstrukcijose yra dėl santykinai mažo medienos tamprumo modulio, kurio reikšmė yra iki 20 kartų mažesnė nei plieno bei puriųjų pradinių medienos deformacijų, nagrinėjant klasikinės medinių konstrukcijų jungtis. Mazgo sukamasis standis ir lenkiamoji galia gali būti nustatomi įvairiais būdais: eksperimentiniais tyrimais, modeliuojant baigtiniais elementais ar skaičiuojant komponentų metodu. Mazgo sukamasis standis turi didelį poveikį bendroms analizuojamo rėmo deformacijoms bei įrašų pasiskirstymui rėmo elementuose. Nors beveik visos medinių konstrukcijų jungtys turi būti analizuojamos kaip pusiau standžios, nei Lietuvos, nei Europos medinių konstrukcijų projektavimo normose nepateikiama metodika jungties sukamajam standžiui nustatyti bei atskirų mazgo komponentų laikomosioms galioms ir standžio koeficientams apskaičiuoti. Praktikoje mazgo lenkiamajai galiai ir standžiui apskaičiuoti dažniausiai taikomas komponentų metodas. Komponentų metodas yra naudojamas pusiau standžių plieninių konstrukcijų mazgų lenkiamosios galios ir sukamojo standžio skaičiavimuose, kuriuose apjungiami visi aktyvūs mazgo komponentai, turintys įtakos šiems mazgo rodikliams. Komponentų metodas nėra pakankamai pritaikytas medinių konstrukcijų jungčių skaičiavimams – nėra pateikiamos atskirų komponentų standžio koeficientų išraiškos. Tam, kad šis metodas būtų taikomas konkrečių mazgų skaičiavimuose, reikalingos atskirų komponentų standžio ir laikomosios galios išraiškos, kurios gali būti nustatomos iš teorinių skaičiavimų arba iš eksperimentinių tyrimų bei modeliavimo baigtiniais elementais rezultatai.

## Darbo aktualumas

Eksperimentinis tyrimas bei modeliavimas baigtiniais elementais yra metodai, leidžiantys tiksliai nustatyti analizuojamo mazgo rodiklius – lenkiamąją galią bei sukamąjį standį, tačiau šie metodai yra brangūs bei reikalaujantys didelių laiko sąnaudų, tad netinkami praktiniame inžineriniame mazgų projektavime. Konstrukcijų ir mazgų projektavime norint įvertinti tikrąją mazgo elgseną būtina gebėti nustatyti analizuojamo mazgo sukamąjį standį paprastesniais teoriniais metodais, tokiais kaip komponentų metodas. Komponentų metodas nėra išvystytas medinių konstrukcijų pusiau standžių mazgų lenkiamosios galios ir sukamojo standžio skaičiavimuose. Ankstesnių autorių tyrimai rodo šio metodo pritaikymą tik paprastoms medinių konstrukcijų jungtims, kuriose paprastai išskiriamas tik vienas aktyvus komponentas. Esant konstrukciniu požiūriu sudėtingoms jung-



tims, ypač pagamintoms iš klijuotosios medienos ir metalo, jungties lenkiamąją galią ir sukamąją standį nulemia ne vienas, tačiau keli, tiek medienos, tiek ir metalo komponentai. Siekiant teoriniais metodais nustatyti tokių jungčių elgseną, susietą su teoriniu lenkiamojo momento ir pasisukimo sąryšiu, yra didelis poreikis komponentų metodą plėtoti jungčių, pagamintų iš medienos ir metalo, skaičiavimams.

## **Tyrimo objektas**

Disertacinio darbo tyrimo objektas – pusiau standaus mazgo iš klijuotosios medienos ir metalo elgsena, apibūdinama lenkiamojo momento ir pasisukimo sąryšiu.

## **Darbo tikslas**

Šio darbo tikslas – išplėsti ir pritaikyti komponentų metodą pusiau standaus mazgo, pagaminto iš klijuotosios medienos ir metalo, lenkiamosios galios ir sukamojo standžio skaičiavimams.

## **Darbo uždaviniai**

Darbo tikslui pasiekti darbe reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Atlikti pasaulyje esamų pusiau standžių mazgų, pagamintų iš medienos ir metalo, analizę bei apžvelgti jų tyrimo metodus.
2. Išanalizuoti komponentų metodo pritaikymo galimybes pusiau standiems mazgams, pagamintiems iš klijuotosios medienos ir metalo, praplečiant plieninių konstrukcijų jungtims pateikiamą metodiką.
3. Išanalizuoti ankstesnius tyrimus, kuriuose pateikiamos atskirų medienos ar medienos ir metalo komponentų laikomosios galios ir standžio koeficientų išraiškos.
4. Eksperimentiniais bandymais nustatyti tiriamo mazgo iš medienos ir metalo lenkiamąją galią ir sukamąją standį.
5. Parengti analizei tinkamą skaitinį modelį baigtinių elementų programiniu paketu, kuriuo remiantis būtų galima nustatyti tiriamo mazgo lenkiamąją galią ir sukamąją standį.

6. Pasiūlyti atskirų medienos ir metalo komponentų stiprio ir standžio nustatymo išraiškas bei sudaryti jungties lenkiamosios galios ir sukamojo standžio skaičiavimo algoritmą, pagrįstą komponentų metodu.

## Tyrimų metodika

Darbe taikomi šie tyrimo metodai: eksperimentiniai tyrimai, modeliavimas baigtinių elementų metodu, skaičiavimas komponentų metodu.

Eksperimentiniais tyrimais nustatyta analizuojamos jungties lenkiamoji galia, gniuždomosios ir tempiamosios sričių deformacijos, susidarantys įtempiai apkrovimo metu.

Naudojant baigtinių elementų programinį paketą sudarytas analizei tinkamas jungties modelis. Atlikus parametrų analizę modelis supaprastinamas – mazgo elementai, neturintys poveikio lenkiamajai galiai ir standžiui, yra nedomeliuojami. Modeliuojama  $\frac{1}{4}$  jungties pritaikant simetrijos sąlygas dviem plokštumoms – taip ženkliai sumažinamos laiko sąnaudos skaičiavimams atlikti.

Išplečiant plieninių konstrukcijų jungtims naudojamą komponentų metodą atliekami teoriniai analizuojamo mazgo skaičiavimai. Komponentų metodas papildomas medienos komponentų standžio ir stiprio koeficientų išraiškomis.

## Darbo mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją buvo gauti šie statybos inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Plieninių konstrukcijų jungtims projektuoti naudojamas komponentų metodas išplėstas papildant medienos komponentų laikomosiomis galiomis bei standžio koeficientų išraiškomis. Pateikiamas išplėstas metodas leidžia teoriškai nustatyti tiriamo pusiau standaus mazgo iš medienos ir metalo lenkiamąją galią ir sukamąjį standį.
2. Sukurtas baigtinių elementų mazgo modelis, leidžiantis skaitiškai nustatyti tiriamos pusiau standžios jungties laikomąją galią ir sukamąjį standį. Sudarytu baigtinių elementų mazgo modeliu galima nustatyti visus galimus irties pobūdžius: nuo plieninių detalių takumo iki medienos irties dėl šlyties išilgai medienos pluošto, tai yra skilimo. Parengtas baigtinių elementų mazgo tūrinis modelis atitinka eksperimento metu gautąją mazgo elgseną bei sąveiką tarp medienos, plieno ir užpildo taikant skirtingo tipo sąveikos modelius. Baigtinių elemen-

tų mazgo modelis apjungia medienos ir plieno medžiagų netiesines savybes.

3. Atlikus eksperimentinius tyrimus nustatyta disertacijoje tiriamo pusiau standaus mazgo laikomoji galia ir sukamasis standis. Nustatytos sąveikos srities tarp medienos, metalo ir užpildo deformacijų reikšmės, kurios panaudojamos komponentų metodui reikiams standžio koeficientų išraiškoms gauti.

## **Darbo rezultatų praktinė reikšmė**

Eksperimentinių tyrimų ir baigtinių elementų modeliavimo rezultatai panaudojami komponentų metodo skaičiavimuose naudojamoms išraiškoms gauti. Pateikiamas tiriamo pusiau standaus mazgo skaičiavimo algoritmas komponentų metodu, pagrįstas išvestomis atskirų komponentų laikomosios galios ir sukamojo standžio koeficientų išraiškomis, gali būti naudojamas praktikoje jungties lenkiamosios galios ir sukamojo standžio skaičiavimuose. Remiantis komponentų metodo skaičiavimais, skaičiuojamojoje pastato scheme gali būti įvertinta tikroji mazgo elgsena, aprašant ją lenkiamojo momento ir pasisukimo sąryšiu.

## **Ginamieji teiginiai**

1. Plieninių konstrukcijų jungtims projektuoti taikomas komponentų metodas gali būti naudojamas analizuojamo pusiau standaus mazgo lenkiamajai galiai ir sukamajam standžiui apskaičiuoti, papildžius jį mazgo medienos komponentų laikomosios galios ir standžio koeficientų išraiškomis.
2. Pateikiama tiriamo pusiau standaus mazgo lenkiamosios galios ir sukamojo standžio skaičiavimo metodika, parengta komponentų metodu bei remiantis išvestomis atskirų komponentų laikomosios galios ir standžio koeficientų išraiškomis, leidžia teoriškai nustatyti jungties lenkiamojo momento ir pasisukimo sąryšį, naudojamą analizuojant ir projektuojant konstrukcijas.
3. Parengtas skaitinis baigtinių elementų mazgo modelis leidžia nustatyti mazgo deformacijas bei sukamąjį standį, atitinkančius eksperimentinio tyrimo metu gautuosius. Sudarytame skaitiniame modelyje įvesti keli skirtingi irties kriterijai, kuriais remiantis galima prognozuoti tiek medienos, tiek metalo irtį, taip nustatant mazgo lenkiamąją galią.

4. Tarpo tarp medienos ir metalo panaikinimui bei glaudžios sąveikos užtikrinimui gali būti panaudojamas užpildas.

## Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema yra atspausdinti 5 moksliniai straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose, iš kurių du *ISI Web of Science* leidiniuose, turinčiuose citavimo indeksą (angl. *Impact factor*). Autoriaus publikacijų sąrašas pateiktas 117–118 puslapiuose.

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti 3 mokslinėse konferencijose Lietuvoje ir užsienyje:

- Jaunųjų mokslininkų konferencijoje „*Mokslas – Lietuvos ateitis*“ 2011 m. Vilniuje;
- Tarptautinėje konferencijoje „*Model Validation and Simulation*“ 2012 m. Veimare, Vokietijoje;
- Tarptautinėje konferencijoje „*Modern building materials, structures and techniques*“ 2013 m. Vilniuje.

## Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai, bendrosios išvados, literatūros šaltinių ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašas. Darbo apimtis su santrauka yra 131 puslapis, neįskaitant priedų. Tekste panaudotos 48 numeruotos formulės, 73 paveikslai ir 11 lentelių. Rašant disertaciją buvo panaudota 119 literatūros šaltinių. Disertacijos pabaigoje pateikta santrauka anglų kalba.

---

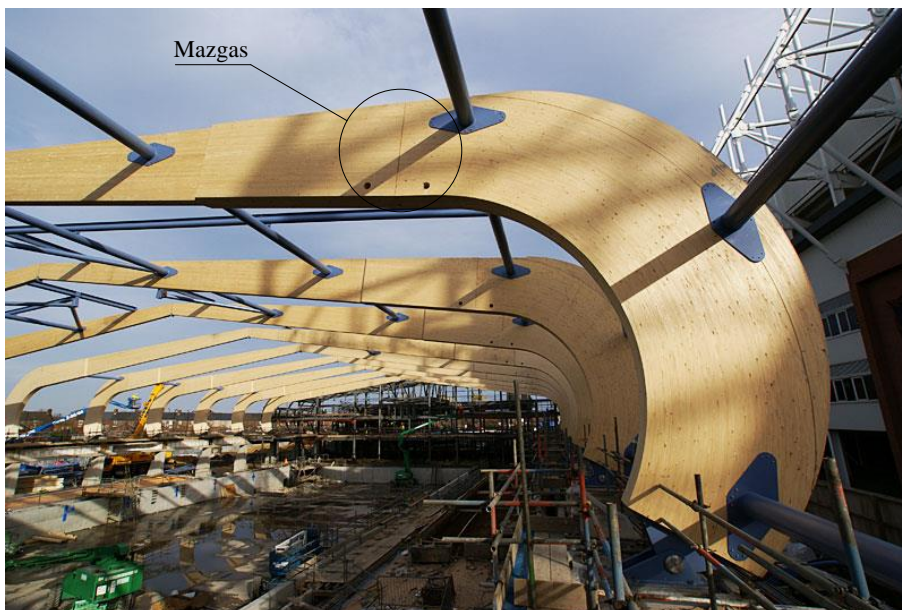
## **Pusiau standžių mazgų iš medienos ir metalo konstravimo principai, analizės metodai ir tyrimo objektas**

Šiame skyriuje pateikiami pusiau standžių mazgų, pagamintų iš medienos ir metalo, konstravimo principai remiantis ankstesniais moksliniais tyrimais. Remiantis ankstesnių mokslinių tyrimų analize bei praktikoje naudojamais mazgų tipais parengiama mazgų jungimo klasifikacija, suskirstant mazgus į keturias grupes. Taip pat apžvelgiami šio tipo pusiau standžių mazgų analizės metodai. Skyriaus pabaigoje pristatoma tolimesniuose tyrimuose analizuojamo pusiau standaus mazgo, pagaminto iš medienos ir metalo, pritaikyto sijiniams elementams jungti, konstrukcija. Skyriaus tematika paskelbtos dvi publikacijos (Gečys 2011, Gečys *et al.* 2013).

### **1.1. Mazgų, pagamintų iš medienos ir metalo, klasifikavimas pagal stiprumą ir standumą**

Klijuotoji sluoksninė mediena – universali statybinė medžiaga, kuri plačiai naudojama klijuotosios medienos konstrukcijų gamyboje (Guan ir Rodd 2001).

Klijuotosios sluoksninės medienos sudėtingiausia vieta – mazgų projektavimas ir įrengimas (Gečys *et al.* 2011). Mazgai medinėse konstrukcijose labai dažnai nulemia ir viso konstrukcinio elemento skerspjūvio matmenis, tad racionalus jų suprojektavimas teikia didelę ekonominę naudą. Klijuotosios sluoksninės medienos konstrukcijų gamybos galimybės yra plačios – tiesios ašies elementų ilgis gali siekti iki 40 m, taip pat gaminami lenktos ašies elementai, kurių gabaritiniai matmenys gali siekti iki 6 m. Esant tokiems skerspjūvio matmenims kiekvieną dieną susiduriama su negabaritinių matmenų konstrukcinių elementų transportavimu. Šiam tikslui naudojami montuojamieji mazgai, kuriuos naudojant elementai, sudalyti į gabaritinius matmenis, statybvietėje sujungiami į vientisus elementus. 1.1 paveiksle pateikiamas statinys, kurio denginio laikantysis rėmas sudarytas iš klijuotosios medienos elementų. Šiuo atveju trijų lankstų rėmo vienos pusės elementas yra 28,0 m ilgio, kuris statybvietėje sujungiamas montuojamąja jungtimi.



**1.1 pav.** Klijuotosios medienos sijinių elementų jungimas panaudojant montuojamąsias jungtis (statinys – plaukimo baseinas Sunderland Aquatic Centre, Didžioji Britanija, šaltinis <http://www.brettschichtholz.de/>)

**Fig. 1.1.** Timber beam-to-beam connection implementation for joining roof structure elements (structure-swimming pool Sunderland Aquatic Centre in Great Britain, source <http://www.brettschichtholz.de/>)

Visos medinių konstrukcijų jungtys paprastai traktuojamos kaip lanksčios, perimančios tik ašines ir skersines jėgas, arba standžios, gebančios perimti aši-

nes, skersines jėgas ir lenkiamuosius momentus. Detaliau analizuojant ir vertinant tikrąją mazgo elgseną, gali būti išskiriama trečioji grupė mazgų, kuri įvardijama kaip pusiau standžios jungtys (angl. *semi-rigid connections*). Plieninių konstrukcijų jungčių klasifikacija pagal stiprumą ir sukamąjį standį pateikiama LST EN 1993-1-8 (2007). Medinių konstrukcijų jungtims klasifikacija pagal stiprumą ir sukamąjį standį nei STR 2.05.07:2005 (2005), nei LST EN 1995-1-1 (2010) nepateikiama, tai yra nenurodomos ribos, kada jungtis turi būti analizuojama kaip lanksti, standi ar pusiau standi. Medinių konstrukcijų projektavimą reglamentuojančiuose dokumentuose pabrėžiama, kad turi būti įvertinamas jungčių deformacijų poveikis bendrai konstrukcijos elgsenai. Kaištinių jungčių medinėse konstrukcijose klasifikacija pagal stiprumą ir standumą, remiantis eksperimentinių tyrimų rezultatais ir jungties poveikio analize bendrai rėmo elgsenai (Racher 1995), pateikiama 1.1 lentelėje.

### 1.1 lentelė. Kaištinių mazgų klasifikavimas pagal stiprumą ir standumą

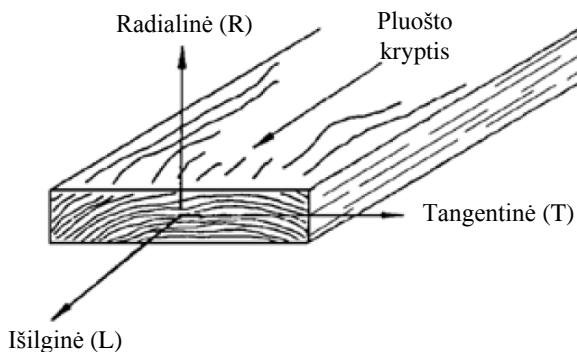
**Table 1.1.** Classification of dowel type timber connections according to strength and stiffness

Pagal stiprumą		Pagal standumą	
Mazgas	Sąlyga	Mazgas	Sąlyga
Pilno stiprumo	$M_{j,Rd} \geq 0,85 M_{full-strength}$	Standus	$S_{j,ini} \geq 12 EI/L$
Dalinio stiprumo	$0,20 M_{full-strength} < M_{j,Rd} < 0,85 M_{full-strength}$	Pusiau standus	$0,50 EI/L < S_{j,ini} < 12 EI/L$
Lankstus	$M_{j,Rd} \leq 0,20 M_{full-strength}$	Lankstus	$S_{j,ini} \leq 0,50 EI/L$

Mediniuose rėmuose visi mazgai – sijų tarpusavio, kolonos ir sijos ar kolonos ir pamato, turėtų būti analizuojami kaip pusiau standūs. Medienos stipris ir tamprumo modulis skersai medienos pluošto, radialine ir tangentine kryptimis yra apytikriai 5–8 kartus mažesnis nei išilgai pluošto, todėl visi mazgai, kuriuose pasireiškia dideli vietiniai įtempiai skersai medienos pluošto, turi būti analizuojami kaip pusiau standūs. Pusiau standaus mazgo elgsena gali būti analizuojama įvairiais metodais – eksperimentiniais, skaitiniais ar analitiniais, ir apibūdinama lenkiamojo momento ir pasisukimo kreive  $M/\varphi$  (Daniūnas ir Urbonas 2008, Jirka ir Mikes 2010, Awaludin ir Smittakorn 2004, Awaludin *et al.* 2007, Chang *et al.* 2004, Daniūnas ir Urbonas 2010, Parisi ir Cordie 2010, Loferski ir Gamalath 1989). Mazgo sukamasis standis turi didelį poveikį bendrai rėmo elgsenai bei atskiro elemento klumpamojo ilgio nustatymui (Masse ir Salinas 1988, Blas 1995, Stehn ir Bojres 2004). Lenkiamojo momento ir pasisukimo santykis iš-

reiškiamas pradiniu sukamuoju standžiu  $S_{j,ini}$ , kurio reikšmė yra nustatoma tampriai tiesinei stadijai. Plieninių konstrukcijų jungtims pradinio sukamojo standžio reikšmė yra priimama iki kol lenkiamojo momento dydis mazge pasiekia  $2/3M_{j,Rd}$  reikšmę.

Mediena yra anizotropinė medžiaga, kurios fizinės ir mechaninės savybės skiriasi išilgai ir skersai medienos pluošto atžvilgiu. Medienoje išskiriamos trys pagrindinės kryptys metinių augimo rėvių atžvilgiu, kaip pateikiama 1.2 paveiksle: išilginė (angl. *longitudinal*), kuri sutampa su medienos pluošto linkme; radialinė (angl. *radial*), kurios kryptis yra statmena medienos metinių rėvių kryptčiai; tangentinė (angl. *tangential*), kurios kryptis yra liestinė medienos metinių rėvių spinduliui (Dinwoodie 2000, Dietenberger *et al.* 1999, Falk *et al.* 2010).



**1.2 pav.** Pagrindinės medienos ašys metinių augimo rėvių atžvilgiu (Falk *et al.* 2010)

**Fig. 1.2.** Three principal axes of wood with respect to grain direction and growth rings (Falk *et al.* 2010)

Tiek vientisosios, tiek klijuotosios sluoksninės medienos elementų bei jungčių inžineriniuose skaičiavimuose paprastai išskiriamos dvi pagrindinės medienos kryptys, tai yra einančios išilgai ir skersai pluošto. Priimant tik dvi pagrindines medienos kryptis, medienos fizinės ir mechaninės savybės yra traktuojamos vienodomis radialine ir tangentine kryptimis. Mediena gali suirti, kai įtempiai viršija stiprį vieną iš šių kryptčių, net kai kitomis kryptimis stipris gali būti pakankamas. Pagrindinis medinio elemento mazgo irties pobūdis yra medienos skilimas išilgai pluošto, kuris paprastai įvyksta dėl šlyties išilgai ir tempimo skersai pluošto įtempių sąveikos (Bartunkova 2013, Schoenmakers ir Jorissen 2011, Johnsson 2004).



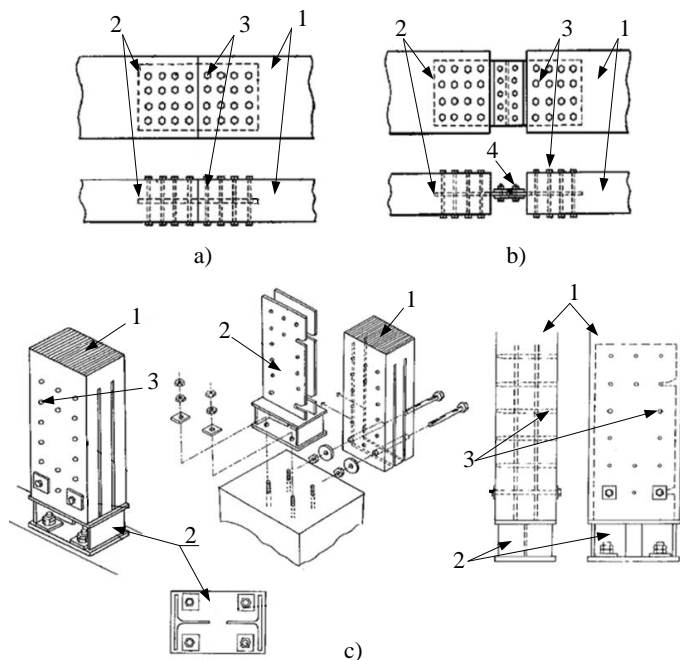
## 1.2. Pusiau standžių mazgų, pagamintų iš medienos ir metalo, konstravimo principai

Pusiau standūs medinių elementų montuojamieji mazgai – tai mazgai, įrengiami statybvietėje ir turintys pakankamą sukamąjį standį bei gebantys perimti lenkiamuosius momentus, ašines ir skersines jėgas. Pusiau standus mazgas medinėse konstrukcijose paprastai komponuojamas panaudojant plienines jungiamąsias detales. Svarbiausias uždavinys yra tinkamas ir patikimas jungiamosios detalės inkaravimas mediniame elemente. Visos projektuojamos ir konstruojamos jungtys turi būti reikiamo sukamojo standžio, kad būtų galima prognozuoti bendrąją rėmo elgseną. Kaip jau buvo minėta anksčiau, viena iš silpnųjų medienos vietų mazguose yra jos skilimas išilgai pluošto, įtempiams viršijus medienos šlyjamąjį, tempiamąjį skersai medienos pluošto stiprį ar dėl šių įtempių bendros sąveikos. Dėl minėtos priežasties mazgas suyra staigiai, jungtyje nepasireiškia ryškos plastinės deformacijos prieš irimą (Bruehl *et al.* 2011, Blas ir Schadle 2011, Jorissen ir Fragiaco 2011, Malo *et al.* 2011, Leijten 2011). Didelis dėmesys yra skiriamas medienos tempimo skersai pluošto įtempių sąveikos su šlyties įtempiais tyrimams. Visos jungtys turi būti konstruojamos, kad būtų išvengta pirmalaikio ar staigaus medienos irimo dėl skilimo išilgai pluošto (Bartunkova 2013, Schoenmakers ir Jorissen 2011, Johnsson 2004, Steiger ir Gehri 2011, Guan ir Inoue 2008, Xu *et al.* 2009, Moses ir Prion 2004). Vienas iš būdų šiam tikslui pasiekti – tai jungtyje panaudoti plienines jungiamąsias detales ar plieninius kaiščius, kuriuose pasireiškia plastinės deformacijos iki medienos irimo (Bruehl *et al.* 2011, Blas ir Schadle 2011). Taip pat efektyvi priemonė plastinei jungties elgsenai pasiekti yra medinio elemento armavimas skersai medienos pluošto. Medienos armavimui jungtyse gali būti naudojami savisriegiai varžtai, kurie įsriegti statmenai ar kampu medienos pluoštui, leidžia išvengti pirmalaikio medienos skilimo (Parisi ir Piazza 2002, Blass ir Bejtka 2005, Trautz ir Koj 2009). Taip pat mediena jungtyse armuojama stiklo pluošto fibromis (Chen *et al.* 2003, Chen 1999), sprausteliais ar faneriniais antdėklais (Bouchair *et al.* 2007, Guan ir Inoue 2008).

Ieškant tyrimams inovatyvaus mazgo, pagaminto iš medienos ir metalo, buvo apžvelgiamos mokslinės publikacijos, analizuojančios klijuotosios medienos konstrukcijų mazgų problematiką. Išanalizavus kitų autorių mokslines publikacijas buvo pasiūlytas tolimesnei analizei naudojamas mazgo tipas. Taip pat, siekiant pasiūlyti praktikoje pritaikomą mazgo konstrukciją, buvo analizuojami esami mazgų tipai. Šiam tikslui pasirinkta Europos patentų duomenų bazė *Espacenet*, kurioje yra daugiau nei 80 000 000 viso pasaulio patentų ([www.espacenet.com](http://www.espacenet.com)). Pagal paieškos duomenis surastos 96 jungtys, kurios gali būti traktuojamos kaip pusiau standžios medinių elementų montuojamosios jungtys. Apibendrinant patentinės apžvalgos duomenis galima išskirti keturis

skirtingus pusiau standžių mazgų, pagamintų iš medienos ir metalo, konstravimo principus, tai yra jungiamosios detalės ir medinio elemento jungimo tipus: plieninių plokštelių ir kaiščių ar smeigių panaudojimas; įklijuotųjų strypų panaudojimas; pleiščių ir užpildų panaudojimas; didelio skersmens strypų panaudojimas. Toliau skyriuje apžvelgiami visi paminėti mazgų konstravimo principai bei apibendrinami ankstesni moksliniai tyrimai, analizuojantys minėtus mazgų tipus.

Konstrukciniu požiūriu vienas paprasčiausių pusiau standžių medinių elementų jungimo mazgų – tai jungimas panaudojant plienines plokšteles ar varžtus. 1.3 paveiksle pateikiami medinių elementų jungimo mazgų, kuriuose panaudojamos plieninės plokštelės ar iš plieno lakštų suvirintos detalės, sprendiniai.



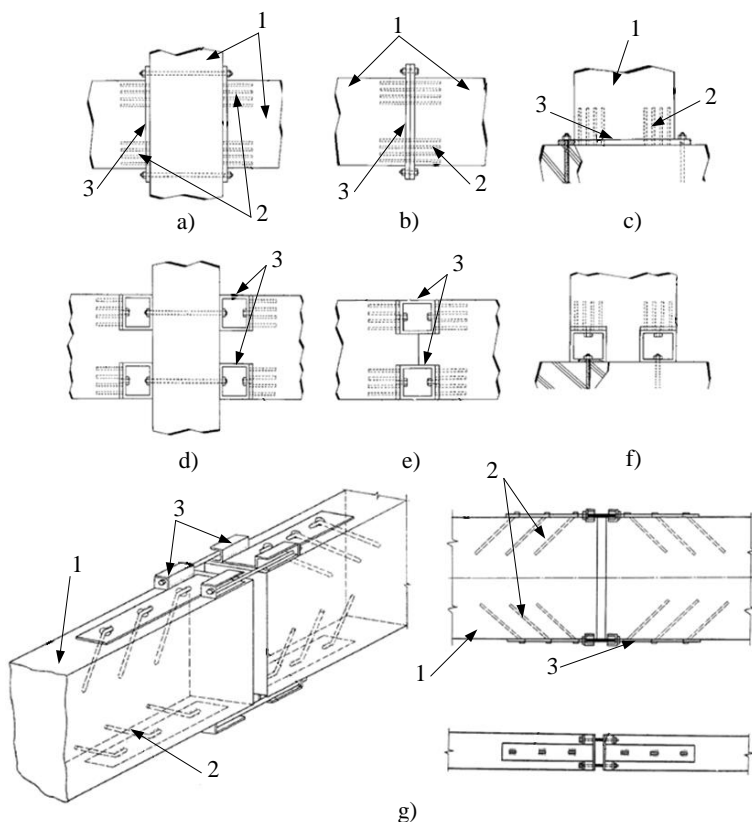
**1.3 pav.** Medinių elementų jungimo mazgai panaudojant plienines plokšteles (a ir b) ir suvirintas detales (c): 1 – medinis elementas; 2 – plieninė detalė; 3 – smeigės ar kaiščiai; 4 – montuojamieji varžtai (www.espacenet.com)

**Fig. 1.3.** Timber-steel connection using steel plates (a, b) and welded steel details (c): 1 – timber element, 2 – steel detail, 3 – dowels, 4 – mounting bolts (www.espacenet.com)

Priklausomai nuo medienoje įmontuojamų plieninių plokštelių skaičiaus, jungtis gali būti vienos, dviejų, keturių šlyties plokštumų ar daugiašlytė (Oudjene ir Khelifa 2010, Sandhass 2012, Dorn *et al.* 2013, Pedersen 2002). Šio tipo jungtys turi pradinį slankumą dėl mediniame elemente ir plieninėje detalėje grę-

žiamų didesnio skersmens, nei varžto ar smeigės skersmuo, kiaurymių. Jungties pradinio slankumo išvengiama naudojant varžtus, kurių skersmuo yra iki 8 mm, ir kuriems medienoje nereikia gręžti kiaurymių. Šių varžtų gale esanti smailė yra trikampio pavidalo, kuriuo varžtas įsriegiamas tiesiogiai į medieną. 1.3 paveiksle pateikiamos kaištinės medinių elementų jungtys analizuojamos kaip pusiau standžios (Guan ir Rodd 2011), pritaikytos kampinėms rėmų jungtims (Kermani 1997, Awaludin *et al.* 2007), ar panaudojant šias jungtis sijiniams elementams tarpusavyje jungti (Awaludin ir Smittakorn 2004). Išdėstant kaiščius minimaliais atstumais mediniuose elementuose, rekomenduotinas papildomas medienos armavimas jungties tempiamojoje srityje, kad irtis įvyktų dėl plieninių detalių takumo ar medienos suglemžimo. Tokiu būdu išvengiama medienos pirmalaikės irties dėl nuskėlimo (Bruehl *et al.* 2011, Blas ir Schadle 2011, Jorissen ir Fragiacomio 2011, Murty *et al.* 2011).

Inkaruojant plienines detales mediniame elemente gali būti panaudojami plieniniai įklijuotieji strypai (Serrano 2001), kaip parodyta 1.4 paveiksle. Naudojant sriegtus plieninius įklijuotuosius strypus gaunama standi jungtis tarp medienos ir metalo, kurioje irimo metu pasiekiamos 0,5–1,0 mm deformacijos (Rossignon 2008, Gečys 2010). Vyrauja dvi pagrindinės plieninių sriegtų strypų įklijavimo medienoje technologijos: strypo įklijavimas į didesnio skersmens kiaurymę ir strypo įsriegimas į mažesnio skersmens kiaurymę, kai sriegimo metu strypas aptepamas kliais (Gečys 2010). Strypai medienoje gali būti įklijuojami įvairiais kampais pluošto atžvilgiu, tai yra lygiagrečiai su pluoštu ar kampu medienos pluoštui, kaip parodyta 1.4 paveiksle. Įklijuotieji strypai plačiai taikomi kampinėms pusiau standžioms rėmo jungtims konstruoti (Vašek ir Blažek 2007, Vašek 2006 ir 2008, Vašek ir Vyhnaček 2006). Kaip alternatyva plieniniams įklijuotiesiems strypams gali būti panaudojami stiklo pluoštu armuoti plastiko strypai (Madhoushi ir Ansel 2008, Brady ir Harte 2008). Taip pat naudojami kietmedžio kaiščiai (Itagaki *et al.* 2004), kurie sukuria tvirtą jungtį su mediena bei pasiekiamas didesnis jungties atsparumas ugniai. Kaip rodo ankstesni tyrimai, atlikti mokslininkų Kero ir Roličiaus (2005), efektyviausia sąveika tarp medienos ir įklijuotojo plieninio sriegtojo strypo pasiekama esant 40–50° posvyrio kampui tarp medienos pluošto ir strypo ašies. Plieninių strypų įklijavimo procesas yra technologiškai sudėtingas ir gali būti įgyvendinamas tik gamykloje esant tam tikroms aplinkos sąlygoms. Kampu medienos pluoštui gali būti sriegiami medsraigčiai, taip supaprastinama jungties įrengimo technologija bei užtikrinama plastinė elgsena (Malo *et al.* 2011). Paskutiniu metu kaip alternatyva lygiagrečiai medienos pluoštui įklijuotiesiems strypams naudojami stambaus sriegio plieniniai sriegti strypai, kurie sriegiami į elemento galą (Jensen *et al.* 2012, Komatsu *et al.* 2012, Wakashima *et al.* 2010, Ellingsbo ir Malo 2012).

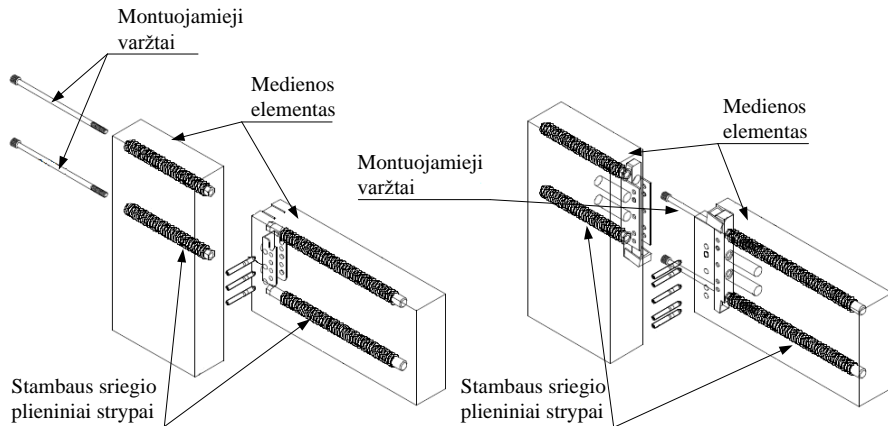


**1.4 pav.** Medinių elementų jungimo mazgai, kuriuose panaudojami įklijuotieji strypai jungiant siją su kolona (a, d); siją su sija (b, e); koloną su pamatu (c, f, g): 1 – medienos elementas; 2 – įklijuotieji strypai; 3 – plieninės detalės ([www.espacenet.com](http://www.espacenet.com))

**Fig. 1.4.** Timber-steel connection using glued-in steel rods used for connecting beam to column (a; d) beam to beam (b; e) and column to foundation: 1 – timber element, 2 – glued-in rod, 3 – steel detail ([www.espacenet.com](http://www.espacenet.com))

Konstrukcinis sprendinys, kai panaudojami stambaus sriegio plieniniai sriegti strypai pateikiamas 1.5 paveiksle. Strypai sriegiami į 3–5 mm mažesnio skersmens, nei vardinis strypo skersmuo, kiaurymes. Įklijuojamo strypo ir stambaus sriegio strypo elgsena medienoje yra skirtinga, paremta skirtingais medienos irties pobūdžiais. Įklijuojamo strypo atveju sąveika tarp medienos ir strypo užtikrinama kliais, tai sąlygoja didelį jungties standumą iki pat irimo stadijos. Šiuo atveju irtis įvyksta staigiai, kai mediena išskeliama išilgai pluošto (Gečys 2010). Medinio elemento ir stambaus sriegio strypo elgsena jungtyje yra skirtinga,

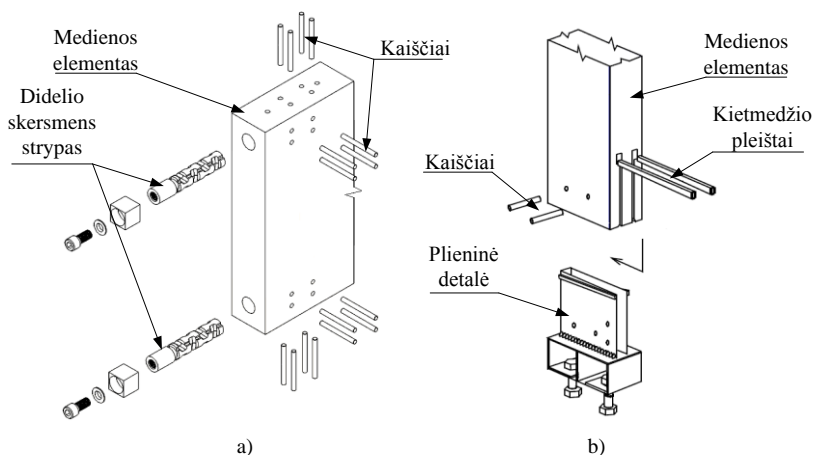
kadangi plieninio strypo sąveika su mediena paremta medienos vietiniu glemžimu sriegio paviršiumi.



**1.5 pav.** Medinių elementų jungtys panaudojant stambaus sriegio įsriegiamus strypus (Wakashima *et al.* 2010)

**Fig. 1.5.** Timber-steel connection using large-screw bolts (Wakashima *et al.* 2010)

Vienas iš konstrukcinių sprendinių didelio skersmens strypo inkaravimui medienoje pateikiamas 1.6 paveiksle, kai strypas fiksuojamas medienoje dvejomis viena kitai statmenomis linkmėmis išdėstytais kaiščiais. 1.6 paveiksle pateikiamo jungiamojo didelio skersmens strypo inkaravimo medienoje sprendimas pritaikytas sijinių elementų tarpusavio, taip pat sijos su kolona jungimo mazguose (Steininger 2003). Pusiau standžiuose mazguose, pagamintuose iš medienos ir metalo, pradinis slankumas, kai kiaurymės skersmuo didesnis nei kaiščio ar glaudžios sąveikos tarp elementų neužtikrinimas, sukelia pradinį nevaržomą jungties pasisukimą. Norint panaikinti ar sumažinti pradinį mazgo slankumą, jungties komponentams turi būti suteikiamas pradinis įtempimas, apspaudimas ar užpildomas tarpas tarp medienos ir jungiamųjų detalių. Šiam tikslui pasiekti jungtyse naudojami kietmedžio ar plieniniai pleištai, kuriais mediena sąlyčio srityje yra apgniuždoma (Komatsu ir Hosokawa 1998), kaip pateikiama 1.6 paveiksle. Pleišto dydžiu gali būti reguliuojamas pradinis mazgo apspaudimas, atitinkamai pasiekiant reikiamą jungties standį (Komatsu ir Hosokawa 1998, Pang *et al.* 2011, Shiratori *et al.* 2009, Guan *et al.* 2008). Vietoje pleiščių gali būti panaudojami įvairių tipų užpildai, kurie užpildytų tarpus tarp medienos ir plieninės jungiamosios detalės, tai leistų užtikrinti glaudžią sąveiką tarp sąveikaujančių skirtingų medžiagų dar iki apkrovimo stadijos. Sąveika tarp medienos ir kitų medžiagų plačiai nagrinėta ankstesniuose Gurkšnio (2006) ir Kavaliausko (2010) tyrimuose.

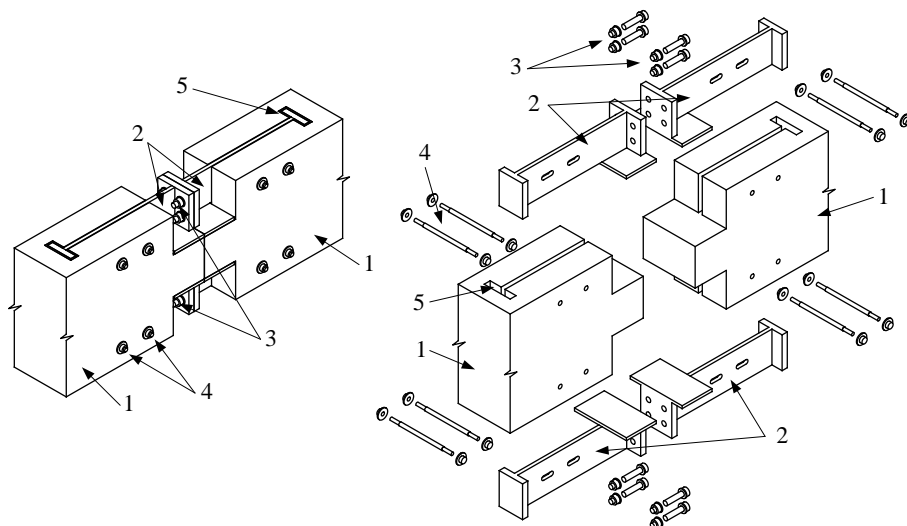


**1.6 pav.** Medinių elementų jungtis: a) panaudojant kaiščius didelio skersmens strypo inkaravimui ([www.espacenet.com](http://www.espacenet.com)); b) kietmedžio pleištu panaudojimas (Komatsu ir Hosokawa 1998)

**Fig. 1.6.** Timber-steel connection: a) using dowels for anchoring of large diameter rod ([www.espacenet.com](http://www.espacenet.com)); b) implementation of hardwood wedges (Komatsu and Hosokawa 1998)

### 1.3. Tolimesniems tyrimams siūlomo inovatyvaus mazgo iš medienos ir metalo konstrukcija

Apžvelgus mokslinius tyrimus bei praktikoje pritaikytų ir užpatentuoatų mazgų konstrukcinius sprendinius buvo pasiūlyta pristatoma pusiau standaus mazgo iš medienos ir metalo konstrukcija (1.7 paveikslas). Analizuojant esamas jungtis buvo nustatyta, kad labai mažai tyrimų yra atlikta su jungtimis, kuriose plieninės detalės mediniuose elementuose inkaruojamos dideliu plotu glemžiant medieną glaudaus sąlyčio su metaline detale vietoje. Siūlomoje jungtyje pradinis sąlytis tarp medienos ir metalo užtikrinamas užpildant tarpą tarp šių medžiagų užpildu. Kuriant jungties konstrukciją buvo siekiama, kad jungtis būtų nesudėtingai sumontuojama statybvietėje montuojamaisiais varžtais. Taip pat skirtingo storio ir ilgio inkaruojamomis detalėmis galima būtų pasiekti reikiamą mazgo stiprį ir standį, atitinkamai padidinant ar sumažinant medienos skeliamąjį ir gniuždomąjį plotus. Mazgo konstrukcija yra universali, tinkanti jungti sijinius elementus tarpusavyje, kolonai su sija bei kolonai su pamatu.



**1.7 pav.** Pusiau standus mazgas iš medienos ir metalo: 1 – medienos elementas; 2 – plieninė jungiamoji detalė; 3 – montuojamieji varžtai; 4 – konstrukciniai varžtai; 5 – medienos ir metalo glaudaus sąlyčio sritis  
**Fig. 1.7.** Semi-rigid timber-steel connection: 1 – timber element, 2 – steel detail, 3 – mounting bolts, 4 – constructive bolts, 5 – tight contact between timber and steel zone

Jungtis komponuojama iš plieninių suvirintų plokštelių, kurios panaudojamos kaip jungiamosios detalės (1.7 paveikslo 2 pozicija) atskiriems mediniams elementams (1.7 paveikslo 1 pozicija) sujungti. Plieninė jungiamoji detalė pasirenkama vienodos konstrukcijos ir viršutinėje, ir apatinėje mazgo dalyse. Jungties tempiamojoje ir gniuždomojoje zonose plieninės jungiamosios detalės medienoje inkaruojamos galine T pavidalo dalimi. Sąveika tarp medienos ir metalo užtikrinama glemžiant medieną glaudaus sąlyčio srityje panaudojus užpildą. Plieninei detalei mediniame elemente centruoti išdroža sąlyčio srityje (1.7 paveikslo 5 pozicija) įrengiama platesnė nei galinė plokštelė. Sumontavus varžtus, sąlyčio sritis tarp medienos ir metalo užpildoma užpildu. Užpildymui naudojamų medžiagų mechaninės savybės, tamprumo modulis bei gniuždomasis stipris turi būti ne prastesni nei medienos. Užpildas turi būti slankios konsistencijos, kad užpildytą sritį tarp medinio elemento ir metalinės detalės. Tiriamoje jungtyje analizuojama dviejų skirtingų užpildų elgsena: dviejų komponentų poliuretano ir cementinis su mikro fibromis.

Tolimesniuose tyrimuose analizuojama mazgo lenkiamoji galia  $M_{j,Rd}$  ir sukamieji standžiai  $S_{j,ini}$  ir  $S_j$ . Mazge, veikiamame lenkiamojo momento, irtis gali įvykti mediniame elemente ar plieninėje detaleje. Galimi šie medinio elemento irties pobūdžiai: medienos trūkis išilgai medienos pluošto jungties tempiamojoje

srityje; medienos suglemžimas glaudaus sąlyčio su plienine detale vietoje ir medienos nuskėlimas. Galimi plieninės detalės irties pobūdžiai: išilginės plokštelės kluptis gniuždomojoje jungties srityje (1.7 paveikslo 2 pozicija); išilginės plokštelės trūkis (1.7 paveikslo 2 pozicija); varžtų trūkis (1.7 paveikslo 3 pozicija) ir galinių plokštelių sulenkimas (1.7 paveikslo 2 pozicija).

## **1.4. Pusiau standžių mazgų iš medienos ir metalo analizės metodai ir ankstesnių tyrimų apžvalga**

Pusiau standaus mazgo iš medienos ir metalo elgsena apibūdinama lenkiamojo momento ir pasisukimo sąryšiu  $M/\varphi$ , kuris gali būti gaunamas įvairiais metodais: eksperimentiniais tyrimais, skaitine analize (modeliuojant baigtinių elementų metodu) ir mechaniniais metodais, iš kurių populiariausias yra komponentų metodas, plačiai pritaikytas plieninių konstrukcijų pusiau standžių mazgų analizėje. Eksperimentiniai tyrimai yra tiksliausias metodas jungties rodikliams nustatyti, tačiau dėl didelių laiko ir finansinių sąnaudų dažniausiai taikomi skaitiniams bei kitiems jungčių analizės metodams pagrįsti. Skaitinė analizė arba modeliavimas baigtiniais elementais šiuo metu yra vienas plačiausiai taikomų metodų. Modeliuojant taikomi įvairūs medžiagų modeliai, skirtingi sąveikos tipai tarp medžiagų, kurie vis realiau atspindi tikrąją jungties elgseną. Komponentų metodas pusiau standžiuose mazguose iš medienos ir metalo nėra plačiai taikomas. Komponentų metodas apjungia visus aktyvius mazgo komponentus, turinčius poveikio tiek lenkiamajai galiai, tiek sukamajam standžiui. Įvairių mokslininkų šioje srityje atliekami tyrimai siejami su vieno aktyvaus komponento identifikavimu. Toliau poskyryje plačiau apžvelgiami pusiau standžių mazgų iš medienos ir metalo analizės metodai.

### **1.4.1. Eksperimentiniai tyrimai**

Pusiau standžių mazgų iš medienos ir metalo eksperimentiniai tyrimai yra tiksliausias būdas nustatyti analizuojamo mazgo stiprio ir standžio rodiklius: lenkiamąją galią ir sukamąjį standį (1.8 paveikslas). Eksperimentiniai tyrimai gali būti atliekami skirtingais tikslais. Nustačius medžiagų fizines ir mechanines savybes, jos gali būti panaudojamos medžiagų modeliams vystyti ir taikyti skaitinėje analizėje. Eksperimentiniai tyrimai taip pat atliekami siekiant nustatyti natūralaus dydžio jungčių rodiklius.





**1.8 pav.** Pusiau standžių mazgų iš medienos ir metalo eksperimentiniai tyrimai: a) keturių taškų lenkimas (Frank *et al.* 2011); b) kampinė rėmo jungtis (Vašek ir Vyhnaček 2006); c) pilno rėmo bandymas (Wakashima *et al.* 2010)

**Fig. 1.8.** Laboratory experiments of semi-rigid timber-steel connections: a) four-point bending test (Frank *et al.* 2011), b) frame corner joint (Vašek ir Vyhnaček 2006), c) full-scale frame test (Wakashima *et al.* 2010)

Pusiau standžių mazgų iš medienos ir metalo eksperimentiniai tyrimai statinė apkrova gali būti suskirstyti į kelias pagrindines grupes pagal bandymo pavidalą:

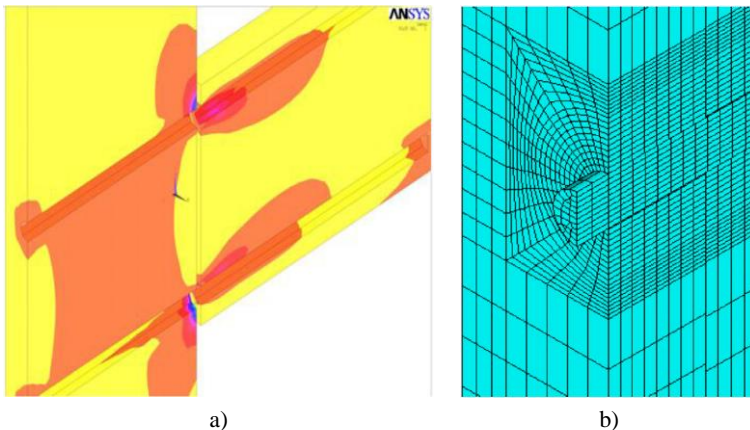
- sijinių elementų tarpusavio jungties tyrimas;
- kampinės sijos ir kolonos jungties tyrimas;
- kolonos ir pamato jungties tyrimas;
- viso rėmo tyrimas.

Eksperimentinis tyrimas, kai mazgas bandomas kaip sijinių elementų tarpusavio jungtis, yra vienas dažniausiai taikomų jungties rodiklių nustatymo būdų. Tiriant jungtis gali būti taikomi: trijų taškų lenkimo bandymas (Bruehl *et al.* 2011); keturių taškų lenkimo bandymas, kai jungtis patenka į gryojo lenkimo sritį (Xu *et al.* 2012, Madhoushi ir Ansel 2008). Trijų ir keturių taškų lenkimo eksperimentiniai tyrimai pritaikyti analizuojant pusiau standžius mazgus iš

medienos ir metalo, įrengtus panaudojant plieninius kaiščius, įklijuotuosius strypus ar savisriegius varžtus. Pusiau standžių mazgų iš medienos ir metalo kampinių sijos ir kolonos mazgų tyrimai yra sudėtingesni dėl elementų įtvirtinimo sąlygų. Tokio tipo eksperimentams atlikti reikia didesnių matmenų bandymo stendų. Daug tyrimų atlikta tiriant kampines jungtis iš medienos ir metalo, kurios sukomponuotos panaudojant įklijuotuosius strypus (Vašek ir Blažek 2007, Vašek 2006 ir 2008, Vašek ir Vyhnaček 2006), kaiščius (Bouchair *et al.* 2007, Hattar ir Cheng 1995), stambaus sriegio strypus (Komatsu *et al.* 2008 ir 2012) bei pleištus ir plienines detales (Guan *et al.* 2008, Komatsu ir Hosokawa 1998, Shiratori *et al.* 2011). Dar rečiau yra atliekami statybinių matmenų rėmų iš medienos ir metalo eksperimentiniai tyrimai, kurie vienu metu gali apimti tiek sijų tarpusavio, tiek kolonų ir sijų, tiek kolonų su pamatu jungimo mazgus (Komatsu *et al.* 2012, Noguchi *et al.* 2006).

#### 1.4.2. Modeliavimas baigtinių elementų metodu

Modeliavimas baigtinių elementų metodu plačiai taikomas pusiau standžių mazgų, pagamintų iš medienos ir metalo, skaitiniuose eksperimentuose (1.9 pav.).



**1.9 pav.** Mazgų iš medienos ir metalo modeliavimas baigtinių elementų metodu: a) kampinė rėmo sijos ir kolonos jungtis su įklijuotaisiais strypais (Vašek ir Vyhnaček 2006); b) kaištinė jungtis (Santos *et al.* 2009)

**Fig. 1.9.** Analysis of timber-steel connections using the finite element method: a) corner beam-to-column connection with glued-in steel rods (Vašek ir Vyhnaček 2006), b) dowel type connection (Santos *et al.* 2009)

Skaitiniam jungčių modeliavimui baigtinių elementų metodu gali būti naudojami įvairūs programiniai paketai: ANSYS, ABAQUS, SolidWorks simulation, Diana ir kitos. Modeliuojant mazgus iš medienos ir metalo, plienas apra-

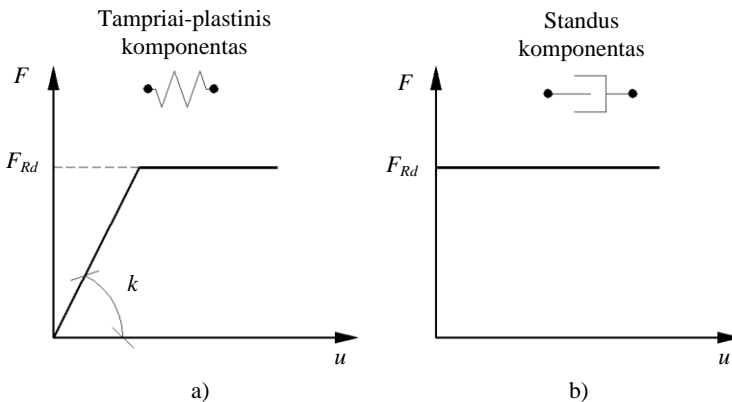
šomas kaip izotropinė medžiaga, kurios fizinės ir mechaninės savybės yra vienodos visomis linkmėmis. Kaip jau buvo minėta, mediena yra anizotropinė medžiaga, kurioje išskiriamos trys pagrindinės ašys (L, R, T), tačiau modeliuojant mazgus iš medienos ir metalo, medienos savybės radialine ir tangentine kryptimis yra vienodos.

Skirtingi medžiagų modeliai gali būti taikomi medienos tampriai ir tampa-plastinei elgsenai aprašyti. Hill (1948) takumo kriterijus plačiai taikomas medienos tampriai-plastinei elgsenai gniuždant aprašyti (Dias *et al.* 2007, Tabarasa 1999, Jasienko ir Kardysz 2007, Oudjene ir Khelifa 2009, Trepiecinski 2010). Hill funkcija plačiai taikoma medienai aprašyti modeliuojant baigtinių elementų metodu vinines (Zhou ir Guan 2011), kaištines jungtis (Oudjene ir Khelifa 2009, Kharouf *et al.* 2003), taip pat įklijuotuosius medienos kaiščius (Loinsigh *et al.* 2012). Tsai Hill ir Tsai Wu medžiagų modeliai leidžia skirtingai aprašyti medienos elgseną gniuždant ir tempiant: gniuždymui aprašyti taikomas tampa-plastinis modelis; tempimui – tamprus iki irimo (Guan ir Zhu 2009, Diaz *et al.* 2013, Fleischmann *et al.* 2004). Modeliuojant baigtinių elementų metodu irimas dėl šlyties ir tempimo skersai medienos pluošto gali būti įvertinamas naudojant Hoffmano kriterijų, kuris pritaikytas jungtyse su įklijuojamais strypais (Xu *et al.* 2012) ir kaištinėse jungtyse (Xu *et al.* 2009). Medienos irimas dėl šlyties išilgai ir tempimo skersai medienos pluošto įtempių sąveikos taip pat gali būti aprašomas naudojant kohezinius elementus (angl. *cohesive elements*). Tokiu atveju galima medienos irtis aprašoma priskiriant atitinkamiems baigtiniams elementams įtempių dydį, kurį pasiekus prarandamas kontaktas tarp elementų (Schmidt ir Kaliske 2009, Resch ir Kaliske 2010). Koheziniams elementams alternatyvus yra kohezinės plokštumos metodas (angl. *surface based cohesive behaviour*), kuris yra paprastesnis, nes savybės yra priskiriamos analizuojamai plokštumai tarp sąveikaujančių dalių (Abaqus documentation 2012, Mirianon *et al.* 2008). Modeliuojant baigtinių elementų metodu vienu metu gali būti taikomi keli medžiagų modeliai, tai yra mediena aprašoma kaip tampa-plastinė ir atitinkamoms dalims priskiriamos kohezinės savybės staigiam medienos irimui prognozuoti (Danielsson ir Gustafsson 2013, Khorsandnia *et al.* 2013, Xu *et al.* 2009, Resch ir Kaliske 2012). Realiai mazgo elgsenai aprašyti didelį poveikį turi teisingas sąveikos tarp sąveikaujančių elementų aprašymas, kuris apima ne tik normaline linkme sąveikos įvertinimą, tačiau ir trinties elgseną, kuriai aprašyti taikomi Coloumb ar Augmented Lagrangian metodai (Zhou ir Guan 2010, Diaz *et al.* 2013, Racher ir Bocquet 2005).

### 1.4.3. Komponentų metodas

Komponentų metodas yra plačiai taikomas pusiau standžių plieninių konstrukcijų mazgų sukamojo standžio ir laikomosios galios skaičiavimuose. Komponentų

metodas pritaikytas plieninių konstrukcijų sijos su sija, sijos su kolona bei kolonos su pamatu varžtiniuose bei virintiniuose mazguose (Faella *et al.* 2000, Del Savio *et al.* 2009, Diaz *et al.* 2011). Plieninių konstrukcijų jungčių atskirų komponentų standžio koeficientų išraiškos ir laikomosios galios pateikiamos LST EN 1993-1-8 (2007). Taikant komponentų metodą analizuojamame mazge išskiriami aktyvūs komponentai. Aktyvūs mazgo komponentai turi poveikio jungties laikomajai galiai ir sukamajam standžiui. Remiantis atskirų komponentų standžio koeficientų išraiškomis nustatomas pradinis sukamasis standis  $S_{j,ini}$ . Lenkiamoji galia  $M_{j,Rd}$  apskaičiuojama remiantis komponentų laikomosiomis galiomis. Išskiriami dviejų tipų komponentai: standūs, kurie įtakoja tik jungties laikomąją galią, ir tampriai-plastiniai, kurie turi įtakos tiek jungties standžiui, tiek laikomajai galiai (1.10 paveikslas).



**1.10 pav.** Komponento apkrovos ir poslinkio sąryšis: a) tampriai-plastinis; b) standus (Faella *et al.* 2000)

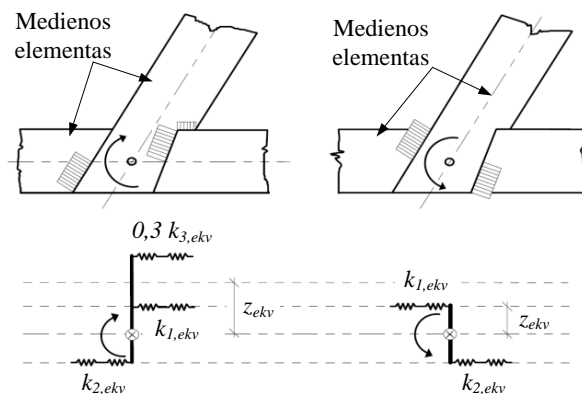
**Fig. 1.10.** Load-displacement relation of the component: a) elastic-plastic, b) rigid (Faella *et al.* 2000)

Komponentų metodas nėra plačiai ištirtas ir pritaikytas pusiau standiems mazgams iš medienos ir metalo. Analizuojant komponentų metodo pritaikymą šio tipo mazguose, pastebėta, kad metodas yra taikytas jungtims, kuriuose paprastai išskiriamas ir nagrinėjamas tik vienas aktyvus komponentas: medienos glemžimas įvairiais kampais pluošto atžvilgiu (Wald *et al.* 2000, Jirka ir Mikes 2010, Descamps *et al.* 2006); įklijuotojo strypo tempimas (Xu *et al.* 2012) ar kaiščio lenkimas (Awaludin ir Smittakorn 2004). Europos medinių konstrukcijų projektavimo norminiuose dokumentuose LST EN 1995-1-1 (2006) pateikiamos tik medienos jungčių su mediena ir medienos plokščių jungčių su mediena virbaliinių ir sprastelinių tvirtiklių slinkties modulių reikšmės  $K_{ser}$ , kurios yra susietos su medienos tankiu ir tvirtiklio skersmeniu.

Mokslininkas Wald *et al.* (2000), tyręs istorines medinių konstrukcijų jungtis (1.11 paveikslas), kuriose jungties sukamąjį standį nusako medienos glemžimas skirtingais kampais, pasiūlė gniuždymo veikiamos medienos standžio koeficiento išraišką  $k_{T,C}$ . Siūloma išraiška yra išvesta remiantis tampriosios puserdės teorija (Wald *et al.* 2000):

$$k_{T,C} = \frac{E_{\alpha} \sqrt{La_r}}{0,80E_{90}}, \quad (1.1)$$

čia  $E_{\alpha}$  – kampu  $\alpha$  glemžiamos medienos gniuždomasis tamprumo modulis;  $L$ ,  $a_r$  – gniuždymo veikiamos medienos ploto ilgis ir plotis;  $E_{90}$  – skersai medienos pluošto glemžiamos medienos gniuždomasis tamprumo modulis.



**1.11 pav.** Komponentų metodo pritaikymas istorinėse medinių konstrukcijų jungtyse (Wald *et al.* 2000)

**Fig. 1.11.** Component method implementation for historic timber connections (Wald *et al.* 2000)

Xu *et al.* (2012) pateikiami sukamojo standžio analitinio skaičiavimo tyrimai, analizuojantys lenkiamojo momento veikiamą jungtį iš medienos ir metalo, įrengiamą panaudojant įklijuotuosius strypus. Medienoje įklijuotojo strypo standžio koeficientas randamas (Xu *et al.* 2012):

$$k_{B,T} = \frac{E_s A}{0,30l_a}, \quad (1.2)$$

čia  $E_s$  – plieno tamprumo modulis;  $A$  – įklijuotojo plieninio strypo skerspjūvio plotas;  $l_a$  – strypo įklėjavimo medienoje ilgis.

1.2 išraiška parodo, kad medienoje įklijuoto plieninio strypo efektyvusis ilgis yra lygus  $0,30l_a$ , tai yra veikiant ašinei jėgai strype deformuojasi tik ši dalis (Xu *et al.* 2012).

## 1.5. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

1. Siekiant tyrimams pasiūlyti inovatyvų mazgo, pagaminto iš medienos ir metalo, konstrukcinį sprendinį buvo apžvelgtos medienos mazgų problematiką analizuojančios publikacijos bei atlikta pasaulyje patentuotų mazgų apžvalga. Apžvelgiant tyrimo rezultatus gali būti išskiriami keturi pagrindiniai mazgų iš medienos ir metalo jungimo būdai: plieninių plokštelių ir kaiščių ar smeigių panaudojimas; įklijuotųjų strypų panaudojimas; pleiščių ir užpildų panaudojimas; didelio skersmens strypų panaudojimas.
2. Įvertinus praktikoje naudojamų mazgų iš medienos ir metalo konstrukcinius sprendinius bei jų privalumus ir trūkumus, tyrimams buvo pasiūlytas inovatyvus medienos elementų jungimo mazgas. Mazgas komponuojamas panaudojant plienines jungiamąsias suvirintas detales, kurios inkaruojamos mediniuose elementuose. Tiek jungties tempiamojoje, tiek gniuždomojoje zonose plieninės jungiamosios detalės inkaruojamos gale line T pavidalo dalimi. Plieninei detalei mediniame elemente centruoti išdroža sąlyčio srityje įrengiama platesnė nei galinė plokštelė.
3. Atliekant esamų mazgų iš medienos ir metalo konstrukcinių sprendinių analizę, nustatyta, kad pagrindinis daugumos mazgų trūkumas yra pradinis mazgo slankumas, kadangi tarp mazge sąveikaujančių atskirų komponentų nėra užtikrintas pradinis sąlytis. Tiriamame mazge glaudžiam sąlyčiui tarp medienos ir plieninės detalės užtikrinti panaudojamas užpildas.
4. Mazgų sukamieji standžiai turi didelį poveikį bendrai rėmo elgsenai, įrąžų pasiskirstymui bei deformacijoms. Medinių konstrukcijų jungtys dažniausiai analizuojamos kaip standžios ar lanksčios. Apžvelgus medinių konstrukcijų mazgų skaičiavimą, nustatyta, kad nei dabartiniame medinių konstrukcijų projektavimą reglamentuojančiame statybos techniniame reglamente, nei Europos medinių konstrukcijų projektavimo normose nėra pateikiamos išraiškos medienos mazgo sukamajam standžiui nustatyti. Šiam tikslui gali būti naudojami įvairūs metodai: eksperimentiniai tyrimai, modeliavimas baigtiniais elementais, analitiniai metodai, komponentų metodas.

5. Komponentų metodas nėra plačiai taikomas mazgų iš medienos ir metalo lenkiamosios galios ir sukamojo standžio skaičiavimuose. Ankstesni atlikti mazgų tyrimai bei pateikiamos išraiškos nesudėtingiems mazgams, kuriuose dažniausiai yra tik vienas aktyvus komponentas, tai medienos glemžimas, kaiščio lenkimas ar medienoje įklijuotojo strypo tempimas.

Atlikus snkstesnių tyrimų analizę, buvo suformuluoti disertacijoje sprendžiami uždaviniai:

1. Išanalizuoti komponentų metodo pritaikymo galimybes analizuojamam pusiau standžiam mazgui iš medienos ir metalo, pasiremiant plieninių konstrukcijų jungtims pateikiama metodika. Išanalizuoti atskirų standžio ir stiprio komponentų nustatymo metodiką.
2. Parengti bandymų planą ir atlikti realių matmenų analizuojamo mazgo eksperimentinius tyrimus.
3. Įsisavinti vieną baigtinių elementų programinį paketą ir parengti analizei tinkamą skaitinį mazgo baigtinių elementų modelį programiniu paketu bei atlikti skaitinę analizę.
4. Pasiūlyti atskirų medienos ir metalo komponentų stiprio ir standžio koeficientų nustatymo išraiškas bei sudaryti jungties lenkiamosios galios ir sukamojo skaičiavimo algoritmą, pagrįstą komponentų metodu.





---

## Mazgų iš medienos ir metalo eksperimentiniai tyrimai

Skyriuje pateikiami disertaciniame darbe analizuojamo pusiau standaus mazgo iš medienos ir metalo konstrukcinių matmenų eksperimentinių tyrimų metodika bei šių tyrimų rezultatai. Mazgas, pagamintas iš medienos ir metalo, analizuojamas statine apkrova kaip sijinių elementų tarpusavio jungtis. Atliekamas keturių taškų lenkimo eksperimentas – mazgas yra grynojo lenkimo zonoje. Atlikus mazgo eksperimentinius tyrimus, atliekami medienos fizinių ir mechaninių savybių tyrimai, skirti skaitiniam modeliui baigtinių elementų metodu ir teoriniams skaičiavimams.

Skyriaus tematika paskelbti trys straipsniai (Gečys *et al.* 2013, Gečys ir Daniūnas 2013, Gečys *et al.* 2015).

### 2.1. Eksperimentiniai bandymai statine apkrova

Inovatyvaus pusiau standaus mazgo iš medienos ir metalo eksperimentiniai tyrimai atliekami apkraunant jungtį trumpalaikė statine apkrova. Pagrindinis eksperimentas – tai keturių taškų lenkimo bandymas (angl. *four-point bending test*), kai analizuojama jungtis yra lanksčiai paremtos sijos viduryje. Tiriamas mazgas

yra grynojo lenkimo zonoje. Eksperimentinių tyrimų rezultatai naudojami teoriniams skaičiavimams bei skaitinės analizės rezultatams pagrįsti. Kartu su mazgo eksperimentu atliekami ir medienos fizinių ir mechaninių savybių tyrimai, kurie reikalingi sudarant realią jungties elgseną atitinkantį skaitinį modelį bei vystant teorinius skaičiavimus.

Medienos skerspjūvio bei plieninės detalės matmenys eksperimentiniams tyrimams parinkti atlikus teorinius jungties skaičiavimus. Nustačius prognozuojamą ardančiąją apkrovą sudaromas laikinis jėgos grafikas, kad atitiktų LST EN 16891:2000 standarte reglamentuojamą bendrą eksperimento laiką.

Pusiau standaus mazgo iš medienos ir metalo, pritaikyto sijinių elementų tarpusavio jungtyje, eksperimentinių tyrimų trumpalaikę apkrova tikslai:

- nustatyti eksperimentinę laikomąją galią  $M_{j,R,exp}$ ;
- nustatyti eksperimentinius sukamuosius standžius  $S_{j,ini,exp}$  ir  $S_{j,exp}$ ;
- nustatyti eksperimentinį mazgo irties pobūdį;
- nustatyti mazgo gniuždomosios ir tempiamosios zonų deformacijas, kurios reikiamos medienos glemžimo po plienine plokštele komponento standžio koeficiento išraiškai gauti;
- ištirti skirtingos sudėties užpildų, dviejų komponentų poliuretaninio ir cementinio, panaudojimo tinkamumą tiriamo tipo jungtyje;
- ištirti medienos fizines bei mechanines savybes, kurios reikalingos skaitinio mazgo modeliui parengti.

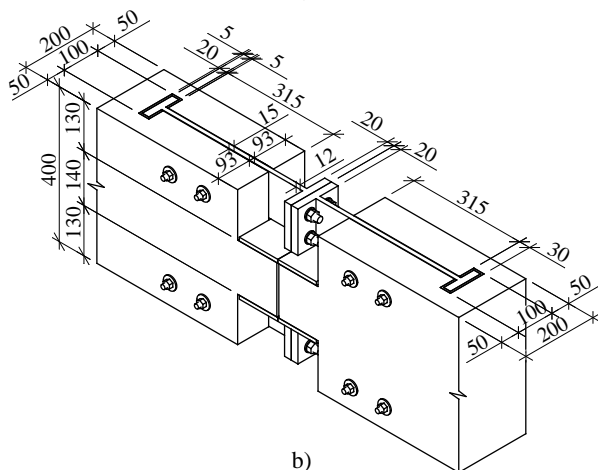
## 2.2. Bandiniai ir naudojamos medžiagos

Eksperimentiškai ištirti penki vienodų geometrinių parametrų mazgai panaudojant skirtingus užpildus tarpui tarp medienos ir metalo užpildyti ir glaudžiai sąveikai šioje srityje užtikrinti. Sumontuotas ir eksperimentiniam tyrimui parengtas mazgas pateikiamas 2.1 paveiksle. Mazgas sumontuojamas bei užpildomas užpildu Vilniaus Gedimino technikos universiteto Metalinių ir medinių konstrukcijų laboratorijoje.

Eksperimentiniams mazgo bandymams naudojama klijuotoji sluoksninė mediena yra pagaminta iš pušies medienos. Klijuotosios medienos klasė yra GL24h pagal LST EN 14080:2013 standartą. Klijuotosios medienos elementas paruošiamas klijuotosios medienos konstrukcijų gamykloje – išgręžiamos visos kiaurymės bei įrengiama išilginė ir skersinė išdrožos plieninei detalei. Skersinė išdroža įrengiama visu kontūru 5,0 mm platesnė nei plieninės detalės galinė T pavidalo plokštelė, įvertinant gamybos netikslumus. Esant tokio storio tarpui užpildo mišinys patenka į visus tarpus tarp medienos ir metalo. Klijuotosios sluoksninės medienos skerspjūvis yra 200x400 mm (2.1 paveikslas) ir sukljuotas iš 40 mm storio lentų (2.2 paveikslas).



a)



b)

**2.1 pav.** Laboratoriniam eksperimentui parengtas mazgas iš medienos ir metalo: a) bendras vaizdas; b) mazgo matmenys

**Fig. 2.1.** Timber-steel connection prepared for the laboratory experiments: a) general view; b) dimensions

Plieninėms detalėms naudojamas S275 klasės plienas pagal LST EN 10025-2:2005 standartą (2.2 paveikslas). Jungiamosios plieninės detalės gaunamos suvirinant atskirus plieno lakštus. Varžtai atskiroms mazgo dalims sujungti į vieną elementą yra M16, 8.8 stiprumo klasės pagal LST EN ISO 4017:2002 standartą. 16 mm skersmens varžtams parenkamos veržlės ir poveržlės atitinkamai pagal LST EN ISO 4032:2002 ir ST EN ISO 7089:2002 standartus.

Tyrimų metu panaudojami dviejų tipų užpildai, kuriais užpildomas tarpas tarp medienos ir plieninės detalės T pavidalo plokštelės. Tiriama viena jungtis, kurioje panaudojamas pirmasis užpildas (bandinio žymėjimas PUR-1), ir keturi mazgai, kuriuose panaudojamas antrasis užpildas (bandiniai žymimi CEM-1, CEM-2, CEM-3, CEM-4).

Pirmasis – tai dviejų komponentų poliuretano pagrindu sudarytas užpildas *PURBOND CR 421* ([www.purbond.com](http://www.purbond.com)), sukuriantis tvirtą jungtį tarp medienos ir metalo (2.3 paveikslas). Pagal gamintojo pateikiamus techninius duomenis naudojant iki 8,0 mm storio užpildas kietėdamas nesusitraukia. Užpildas paprastai naudojamas plieniniams sriegiams strypams medienoje įklijuoti. Deklaruojamos užpildo fizinės ir mechaninės savybės yra ne prastesnės nei: tamprumo modulis  $E_{PUR} = 4,0$  GPa; gniuždomasis stipris  $f_{c,PUR} = 79,9$  MPa; tempiamasis stipris  $f_{t,PUR} = 25,0$  MPa.



**2.2 pav.** Eksperimentiniams tyrimams naudojami elementai: a) klijuotosios sluoksninės medienos elementas; b) suvirinta plieninė detalė  
**Fig. 2.2.** Elements used for the experimental investigations: a) glued laminated timber element, b) welded steel detail

Antrasis užpildas – tai *EMACO Nanocrete R4 Fluid* ([www.basf-cc.co.uk](http://www.basf-cc.co.uk)), kurio sudėtyje yra portlandcemenčio, frakcionuoto smėlio, specialiai parinkto polimerinio plaušo ir specialių priedų, kurie kompensuoja susitraukimo deformacijas. Užpildas naudojamas betoninių ir gelžbetoninių elementų konstrukcijam remontui. Cementinis užpildas, priklausomai nuo vandens kiekio jo sudėtyje, gali būti nuo slankios iki liejamos konsistencijos. Pagal gamintojo pateikiamus duomenis sluoksnio storis gali būti iki 200 mm. Šių tyrimų metu buvo pasirinktas liejamos konsistencijos mišinys, kuris gerai užpildo tarpą tarp medienos ir metalo. Užpildomo tarpo pločio nuokrypis buvo 2–3 mm, tačiau dėl sudėtyje esančių polimerinių plaušų kietėjimo metu nesutrūkinėjo. Cementinio užpildo pateikiamos fizinės ir mechaninės savybės: tamprumo modulis  $E_{CEM} = 20$  GPa; gniuždomasis stipris  $f_{c,CEM} = 55,0$  MPa; tempiamojo stiprio reikšmė nepateikiama, kadangi užpildas neperima tempiamųjų įtempių.



**2.3 pav.** Skirtingo tipo užpildai tarpui tarp medienos ir metalo užpildyti:

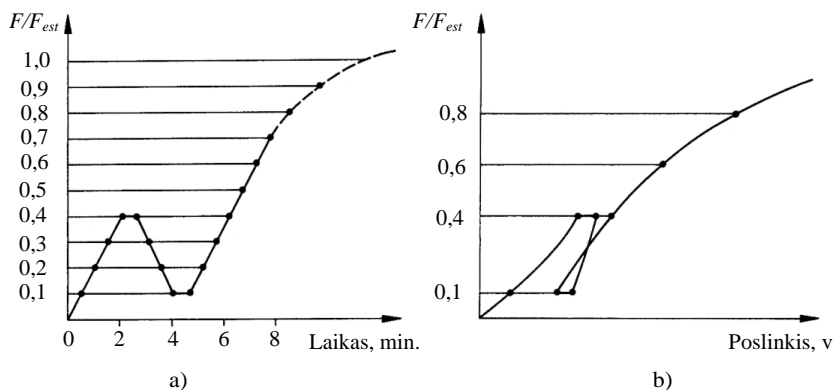
a) dviejų komponentų poliuretano; b) cementinis

**Fig. 2.3.** Different types of fillers between timber and steel:

a) polyurethane based filler, b) cement based filler

## 2.3. Eksperimentinių bandymų metodika

Pusiau standus mazgas iš medienos ir metalo eksperimentiškai buvo tiriamas apkraunant trumpalaikę apkrovą iki irimo pagal LST EN 26891:2000 standarto nurodymus (2.4 paveikslas).



**2.4 pav.** Mazgo jėgos kreivės pagal LST EN 26891:2000:

a) laikinė; b) deformacinė

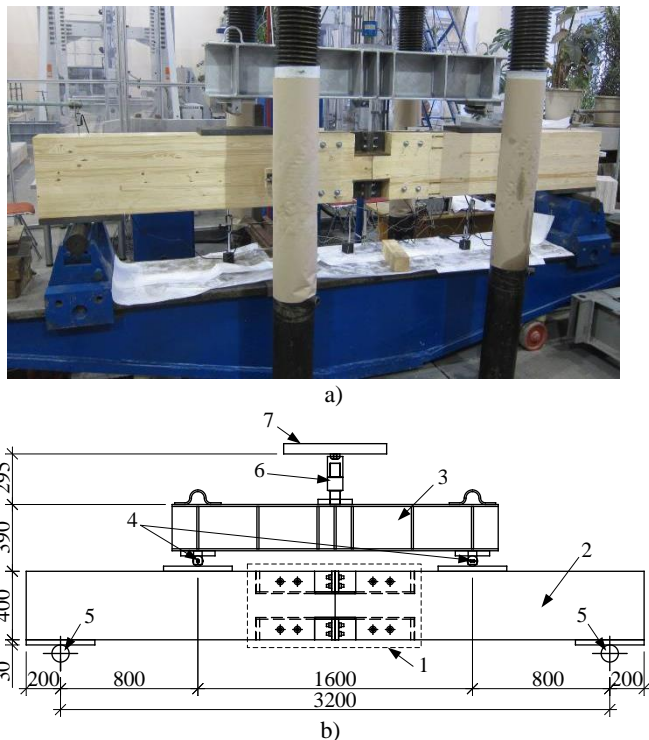
**Fig. 2.4.** Load curves of the connection according to LST EN 26891:2000:

a) load-slip curve, b) load-time curve

Nustačius prognozuojamą ardančiąją apkrovą  $F_{est}$ , kuri bus pasiekta bandant mazgą iki suirimo, sudaroma mazgo laikinė jėgos kreivė (2.4 paveikslas). LST EN 26891:2000 standartas reglamentuoja bendrą eksperimento laiką, kuris yra 10–15 min, kadangi tai turi poveikio rezultatams. Pagal šį standartą mazgas pra-

džioje apkraunamas iki 40 % prognozuojamos ardančiosios apkrovos reikšmės. Pasiekus šią reikšmę, apkrova sustabdoma ir atliekamas pirmasis 30 s išlaikymas. Po pirmojo išlaikymo apkrova mažinama iki 10 % prognozuojamos ardančiosios apkrovos, ir taip pat išlaikoma 30 s. Po pirmojo apkrovimo-nukrovimo ciklo apkrova mazgui suteikiama vienodu greičiu iki suirimo. 2.4 paveiksle taip pat pateikiama idealizuota mazgo deformacinė jėgos kreivė.

Eksperimentiniai tyrimai atliekami Vilniaus Gedimino technikos universiteto Taikomojoje statinių, konstrukcijų ir medžiagų laboratorijoje. Pagrindiniam mazgo lenkimo bandymui naudojamas 1 000 tonų galios bandymo stendas. Eksperimentiškai tiriamas mazgas yra lanksčiai atremtos dviejų atramų 3,20 m sijos viduryje (2.5 paveikslas).



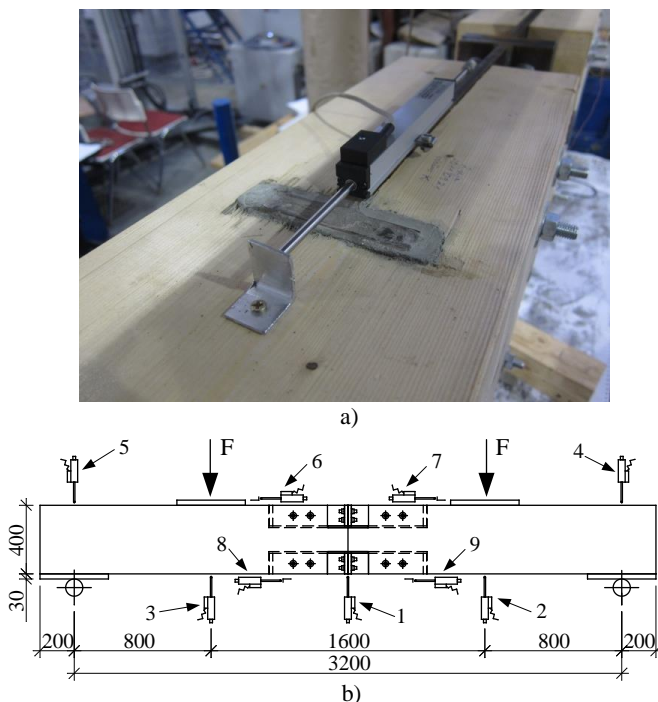
**2.5 pav.** Mazgo eksperimentinio bandymo bendras vaizdas (a) ir schema (b):

- 1 – mazgo sritis; 2 – klijuotosios sluoksninės medienos elementas;
- 3 – skersinė sija; 4 – apkrovos pridėjimo sijai taškai; 5 – lanksčios atramos;
- 6 – dinamometras; 7 – preso plokštė

**Fig. 2.5.** The laboratory testing general view (a) and scheme (b):

- 1 – connection area, 2 – glued laminated timber element, 3 – cross beam,
- 4 – load additive points, 5 – pinned supports, 6 – dynamometer,
- 7 – loading machine plate

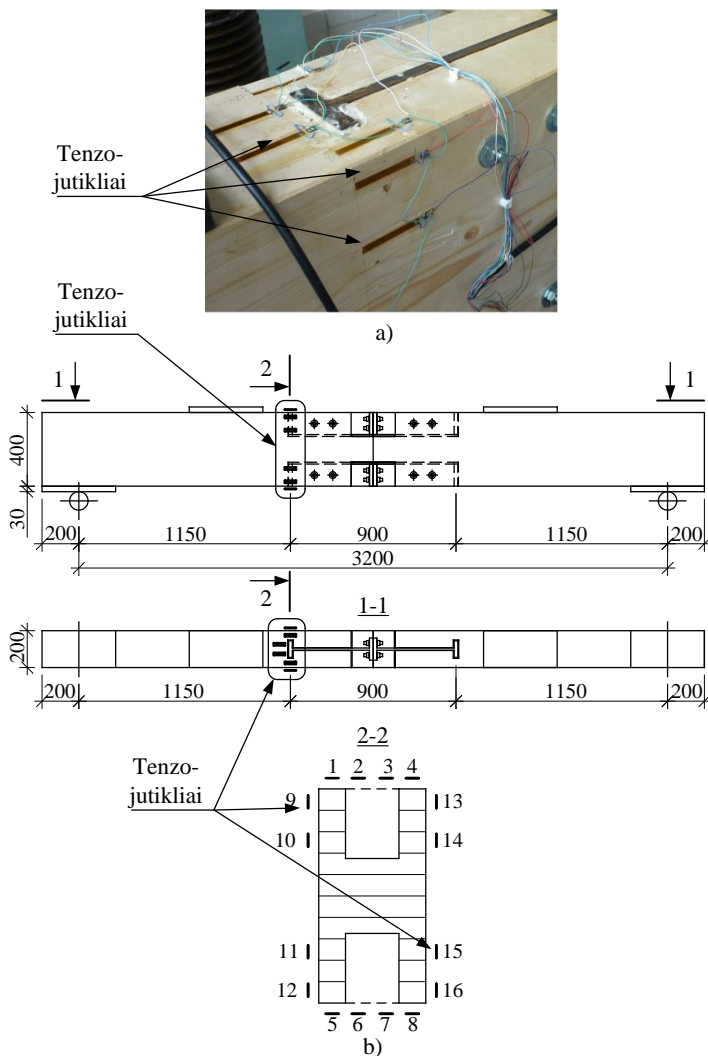
Viso bandymo metu fiksuojami sijos ir mazgo poslinkiai tiesiniais elektroniniais poslinkių jutikliais (2.6 paveikslas). Atliekant bandymą iš viso sumontuojami 9 poslinkių matavimo jutikliai: 1–5 yra skirti mazgo bei sijos vertikaliesiems poslinkiams matuoti – atramose, apkrovos pridėjimo vietose ir mazgo centre; 6–9 yra skirti glaudaus sąlyčio tarp medienos, metalo ir užpildo deformacijoms matuoti. 6–9 tiesinių poslinkių jutiklių matavimo bazė yra 50 mm ir 80 mm, kuri apima medienos, užpildo ir metalo deformacijas glaudaus sąlyčio srityje (2.6 paveikslas). 50 mm matavimo bazė naudota bandiniams su poliuretano užpildu, 80 mm – bandiniams su cementiniu užpildu.



**2.6 pav.** Mazgo poslinkių matavimo jutiklių išdėstymas: a) bendras poslinkių jutiklio vaizdas; b) išdėstymo schema

**Fig. 2.6.** The layout of displacement indicators: a) general view of displacement indicator, b) layout scheme

Apkrovimo metu taip pat matuojamos medienos paviršiaus deformacijos tenzjutikliais, kurių duomenys vėliau panaudojami įtempiams mediniame elemente nustatyti. Kiekviename mediniame elemente panaudojama 16 vienetų tenzjutiklių (2.7 paveikslas). Tenzjutikliai klijuojami ties plieninės detalės, galinės T pavidalo plokštelės, inkaravimo mediniame elemente vieta. Eksperimentiniams bandymams naudojamų tenzjutiklių matavimo bazė yra 50 mm.



**2.7 pav.** Tenzojutiklių išdėstymas medienos elemente:

a) bendras vaizdas; b) išdėstymo schema

**Fig. 2.7.** The strain gauges on timber element:

a) general view, b) layout scheme

## 2.4. Eksperimentinių tyrimų rezultatai

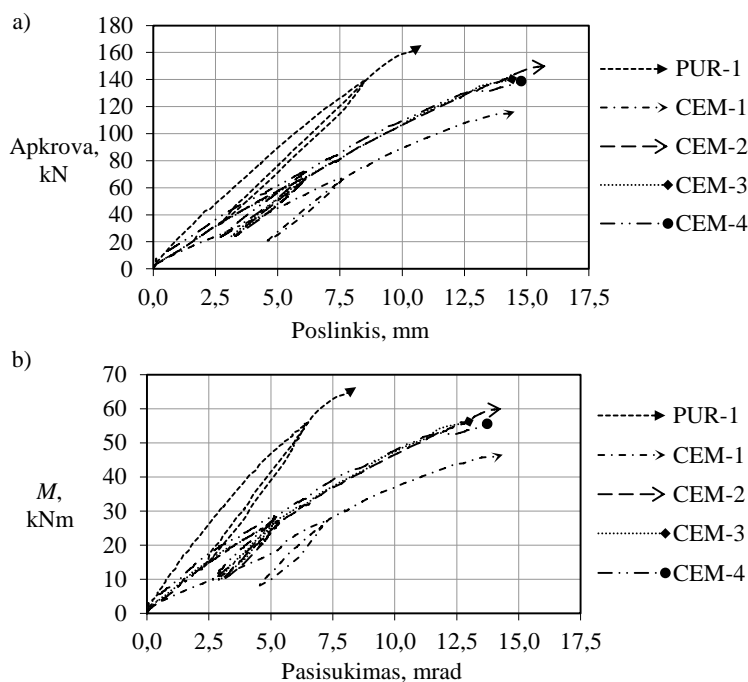
Šiame poskyryje pateikiami eksperimentinių tyrimų rezultatai: lenkiamosios galios, sukamieji standžiai, poslinkiai ir deformacijos bei įtempiai medienoje



reikšmės. Detaliai aptariami eksperimentiniai irties pobūdžiai. Taip pat pateikiami medienos fizinių ir mechaninių savybių tyrimo rezultatai.

### 2.4.1. Mazgo sukamieji standžiai, lenkiamoji galia, įtempių medienoje reikšmės

Bandymo metu pagal 2.5 paveiksle pateikiamas schemas matuojami mazgo vertikalus ir horizontalus poslinkiai bei deformacijos. 2.8 paveikslo viršuje pateikiamos apkrovos ir centrinio mazgo (1 poslinkio daviklis pagal 2.6 paveikslą) vertikalus poslinkio kreivės. Eksperimentiškai nustatytas lenkiamojo momento ir pasisukimo sąryšis pateikiamas 2.8 paveiksle.



**2.8 pav.** Apkrovos ir mazgo vidurinio taško (1 poslinkio daviklis pagal 2.6 pav.) (a) bei lenkiamojo momento ir pasisukimo kreivės (b)

**Fig. 2.8.** Load-central point (displacement indicator No. 1. according to Fig. 2.6.) displacement curves (a) and the bending moment-rotation curves (b)

Lenkiamojo momento ir pasisukimo kreivės nustatomos pagal viduriniojo analizuojamo mazgo (1 poslinkio daviklis pagal 2.6 paveikslą) ir apkrovos priėmimo vietų taškų poslinkių (2 ir 3 poslinkių davikliai pagal 2.6 paveikslą) skir-

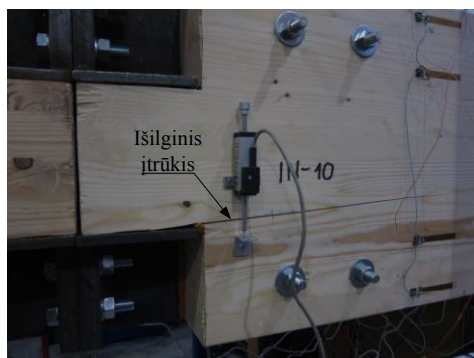
tumus. 2.8 paveiksle pateikiamos kreivės nusako skirtingą mazgo elgseną esant skirtingiems užpildų tipams. Panaudojant dviejų komponentų poliuretaninį užpildą (bandinys PUR-1) gaunamas mazgas, kurio eksperimentinis pradinis sukamasis standis  $S_{j,ini,exp}$  yra didesnis. Analizuojamu atveju pradinis sukamasis standis yra apytikriai 33 % didesnis nei panaudojant cementinio pagrindo užpildus (bandiniai CEM-2, CEM-3, CEM-4). Šis sukamojo standžio skirtumas gali būti grindžiamas tuo, kad poliuretano pagrindo užpildai gerai sukimba su mediena ir geba perimti tempiamuosius įtempius, kurie pagal gamintojo pateikiamus techninius duomenis yra ne mažesni nei 25,0 MPa. Lenkiamoji galia mazgo su poliuretaniniu užpildu (bandinys PUR-1) yra 16 % didesnė palyginti su vidutine mazgų su cementiniu užpildu reikšme, ir tai gali būti grindžiama ta pačia prielaida, kad tempiamojoje jungties zonoje dalį tempiamųjų įtempių perima poliuretaninis užpildas, taip padidinama laikomoji galia. Mazgo viduriniojo taško poslinkis esant skirtingiems užpildams apytikriai skiriasi 50 % esant maksimaliai apkrovai irimo metu. Mazgų eksperimentinių tyrimų suvestinė, paremta linijinių poslinkių daviklių duomenimis bei laikomosiomis galiomis ir standžiais, pateikiama 2.1 lentelėje.

**2.1 lentelė.** Eksperimentinės lenkiamosios galios, sukamieji standžiai ir deformacijos  
**Table 2.1.** Experimental moment resistances, rotational stiffness and deformations

Bandinys	$M_{j,R,exp}$ kNm	$S_{j,ini,exp}$ kNm/rad	$u$ , mm	$u_T$ , mm	$u_C$ , mm
PUR-1	66,24	8401	10,78	0,97	0,23
CEM-1	46,48	3503	14,52	1,44	1,35
CEM-2	59,96	5402	15,76	1,24	1,12
CEM-3	56,16	5438	14,42	1,58	0,59
CEM-4	55,56	6006	14,77	1,70	0,67

CEM-2, CEM-3, CEM-4 bandinių lenkiamosios galios  $M_{j,R,exp}$  ir pradinio sukamojo standžio  $S_{j,ini,exp}$  eksperimentinių reikšmių sklaida yra atitinkamai 4,7 % ir 5,2 %. Tai rodo nedidelę rezultatų sklaidą panaudojant to paties tipo cementinį užpildą. Mazgo CEM-1 laikomoji galia yra 23 % mažesnė palyginti su to paties užpildo vienodų geometrinių parametrų mazgais CEM-2 ... CEM-4. Taip pat bandinio CEM-1 pradinis sukamasis standis yra apytikriai 36 % mažesnis nei šio užpildo bandinių vidurkis. Šio mazgo laikomosios galios ir sukamojo standžio sumažėjimas gali būti grindžiamas tuo, kad bandinyje CEM-1 prieš eksperimentą staigaus skerspjūvio pasikeitimo vietoje pastebėtas išilginis džiūvimo įtrūkis (2.9 paveikslas). Mikroskopu nustatytas pradinis trūkio plotis yra

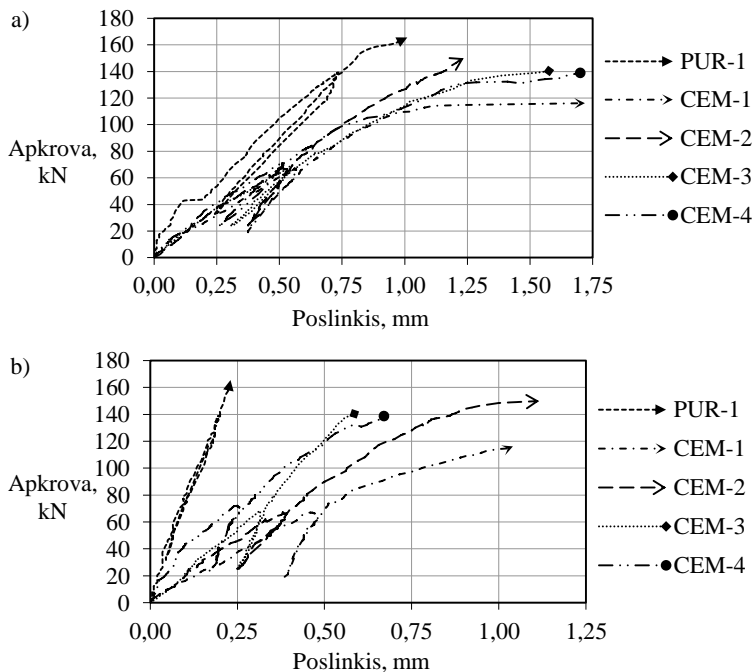
1,58 mm, ilgis – apytikriai 300 mm. Apkrovimo metu įtrūkio ilgis nedidėjo išilgine linkme lygiagrečiai medienos pluoštui, tik plėtėjo didinant apkrovą. Įtrūkių poveikis disertaciniame darbe nėra plačiau analizuojamas. Kitų autorių ankstesni tyrimai, analizuojantys technologinių įtrūkių poveikį kaištinėms jungtims iš medienos ir metalo, parodė, kad priklausomai nuo įtrūkių kiekio, laikomoji galia sumažėja iki 5–20 % palyginti su nesupleišėjusia jungtimi (Sjodin 2008).



**2.9 pav.** Išilginis džiūvimo įtrūkis CEM-1 bandinyje  
**Fig. 2.9.** Longitudinal drying crack in the specimen CEM-1

Siekiant pagrįsti skaitiniais metodais gautas jungties glaudaus sąlyčio medienos, užpildo ir metalo srityje tempiamojoje ir gniuždomojoje zonose esančių komponentų standžio reikšmės, matuojamos gniuždomosios ir tempiamosios mazgo zonų deformacijos. Gniuždomojoje jungties zonoje deformacijos nustatomos pagal 6 ir 7 poslinkių daviklius; tempiamojoje zonoje pagal 8 ir 9 poslinkių jutiklius, pagal 2.6 paveikslą. 2.10 paveiksle pateikiamos vidutinės mazgų tempiamosios ir gniuždomosios zonų deformacijų reikšmės. Iš 2.10 paveikslo matyti, kad anksčiau aptarti išilginiai džiūvimo įtrūkliai ties staigiu skerspjūvio pokyčiu CEM-1 jungties tempiamojoje zonoje, iki pasiekama 80 % laikomosios galios, poveikio neturi. Naudojant cementinio pagrindo užpildą (bandiniai CEM) pastebimos negrįžtamosios deformacijos pasiekus 40 % nuo maksimalios laikomosios galios. 2.10 paveikslas pažymi, kad esant skirtingiems užpildams gaunama skirtinga elgsena – naudojant poliuretalinį užpildą (bandinys PUR-1) pasireiškia žymiai mažesnės deformacijos.

Ekspimento metu matuojamos medienos paviršiaus deformacijos panaudojant tenzjutiklius (2.7 paveikslas). Tenzjutiklių duomenys panaudojami nustatant įtempį reikšmes mediniuose elementuose. 2.2 lentelėje pateikiamos maksimalios normalinių įtempų mediniuose elementuose reikšmės („–“ žymi gniuždomuosius įtempius; „+“ žymi tempiamuosius įtempius).



**2.10 pav.** Apkrovos ir pailgėjimo sąryšis: a) tempiamojoje zonoje (vidutinės poslinkių jutiklių 8 ir 9 reikšmės); b) gniuždomojoje zonoje (vidutinės poslinkių jutiklių 6 ir 7 reikšmės)

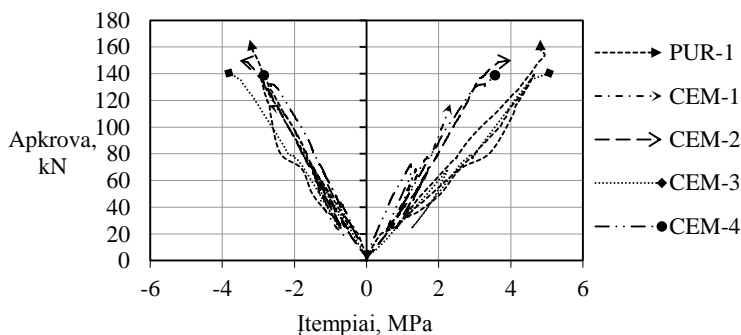
**Fig. 2.10.** Load-displacement curves: a) in the tension zone (the mean value between 8 and 9 indicator), b) compressive (the mean value between 6 and 7 indicator)

**2.2 lentelė.** Eksperimentinių normalinių įtempių medienoje reikšmės

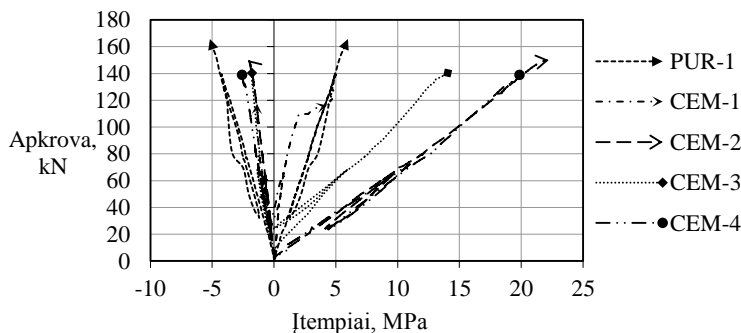
**Table 2.2.** Experimentally determined normal stress in timber element

Tenzojutiklio Nr.	PUR-1, MPa	CEM-1, MPa	CEM-2, MPa	CEM-3, MPa	CEM-4, MPa
1 ir 4	-3,237	-2,701	-3,521	-3,821	-2,847
5 ir 8	4,818	2,320	4,015	5,062	3,553
2 ir 3	-5,175	-1,379	-2,101	-1,777	-2,571
6 ir 7	5,987	4,275	22,23	14,04	19,86
9 ir 13	-5,881	-8,290	-3,010	-3,683	-4,453
12 ir 16	3,999	2,847	10,76	5,703	4,072
10 ir 14	-4,713	-2,807	-2,109	-3,099	-3,204
11 ir 15	3,180	1,679	13,57	9,175	3,748

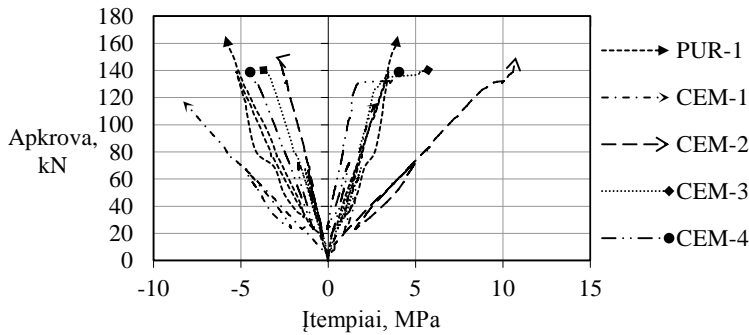
2.11–2.14 paveiksluose pateikiamos apkrovos ir normalinių įtempių, veikiančių lygiagrečiai medienos pluošto atžvilgiu, reikšmės. Grafikuose pateikiamos vidutinės reikšmės tarp dviejų tose pačiose skerspjūvio vietose esančių (veidrodinių vertikalios ašies atžvilgiu) tenzjutiklių parodymų reikšmių, kadangi įtempių reikšmės yra labai artimos. Gniuždomieji normaliniai įtempiai, susidarantys medinio skerspjūvio viršutinėje zonoje, pažymimi neigiamomis reikšmėmis; tempiamieji įtempiai, atitinkamai medienos elemento apačioje, žymimi teigiamomis įtempių reikšmėmis. Iš paveikslų 2.11–2.14 matyti, kad įtempiai jungties tempiamomojoje ir gniuždomojoje zonose pasiskirsto netolygiai, tai yra tempiamomojoje zonoje susidaro apytikriai 23 % didesni įtempiai. Didžiausias skirtumas (iki 32 %) tarp gniuždomųjų ir tempiamųjų normalinių įtempių pastebimas PUR-1 jungtyje dėl sudėtingos sąveikos tarp medienos ir užpildo.



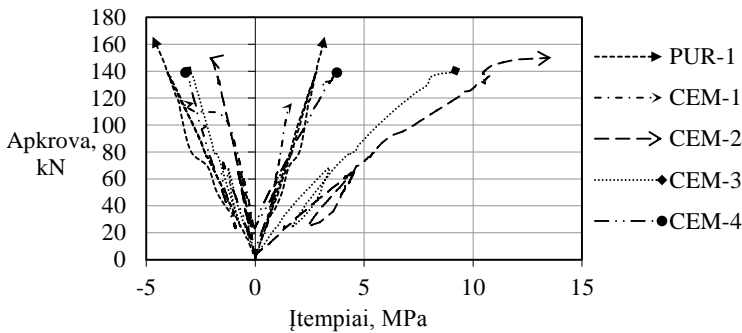
**2.11 pav.** Apkrovos ir įtempių kreivės: jungties gniuždomojoje (1 ir 4 tenzjutikliai) ir tempiamojoje (5 ir 8 tenzjutikliai) zonose  
**Fig. 2.11.** Load-stress curves: in the compressive zone (1 and 4 strain gauges) and tension (5 and 8 strain gauges)



**2.12 pav.** Apkrovos ir įtempių kreivės: jungties gniuždomojoje (2 ir 3 tenzjutikliai) ir tempiamojoje (6 ir 7 tenzjutikliai) zonose  
**Fig. 2.12.** Load-stress curves: in the compressive zone (2 and 3 strain gauges) and tension (6 and 7 strain gauges)



**2.13 pav.** Apkrovos ir įtempių kreivės: jungties gniuždomojoje (9 ir 13 tenzjutikliai) ir tempiamojoje (12 ir 16 tenzjutikliai) zonose  
**Fig. 2.13.** Load-stress curves: in the compressive zone (9 and 13 tensor sensors) and tension (12 and 16 tensor sensors)



**2.14 pav.** Apkrovos ir įtempių kreivės: jungties gniuždomojoje (10 ir 14 tenzjutikliai) ir tempiamojoje (11 ir 15 tenzjutikliai) zonose  
**Fig. 2.14.** Load-stress curves: in the compressive zone (10 and 14 tensor sensors) and tension (11 and 15 tensor sensors)

Pagal 2.11 paveikslą pateikiamas kreivės visais atvejais (išskyrus bandinį CEM-1, kuriame tempiamojoje zonoje pastebėtas išilginis technologinis įtrūkis) didesni įtempiai susidaro jungties tempiamojoje zonoje, tačiau pastaruoju CEM-1 atveju didesni įtempiai susidaro jungties gniuždomojoje srityje, kadangi supleišėjusi zona geba perimti mažesnius įtempius.

2.12 paveikslą pateikiamos apkrovos ir įtempių kreivės glaudaus medienos, užpildo ir metalo sąveikos srityje. Šios kreivės pažymi, kad esant skirtingiems užpildams sukuriami skirtinga sąveika tarp medienos ir metalo. Panaudojant poliuretanių užpildą (bandinys PUR-1) jungties tempiamoji ir gniuždomoji zonos apkraunamos tolygiai, tai yra gaunamos iš esmės vienodos sąlygos jungties tempiamojoje ir gniuždomojoje srityse. Jungtyse su cementiniu užpildu (bandi-

niai CEM) įtempių reikšmės glaudaus sąlyčio vietoje jungties tempiamojoje ir gniuždomojoje srityse skiriasi iki kelių kartų.

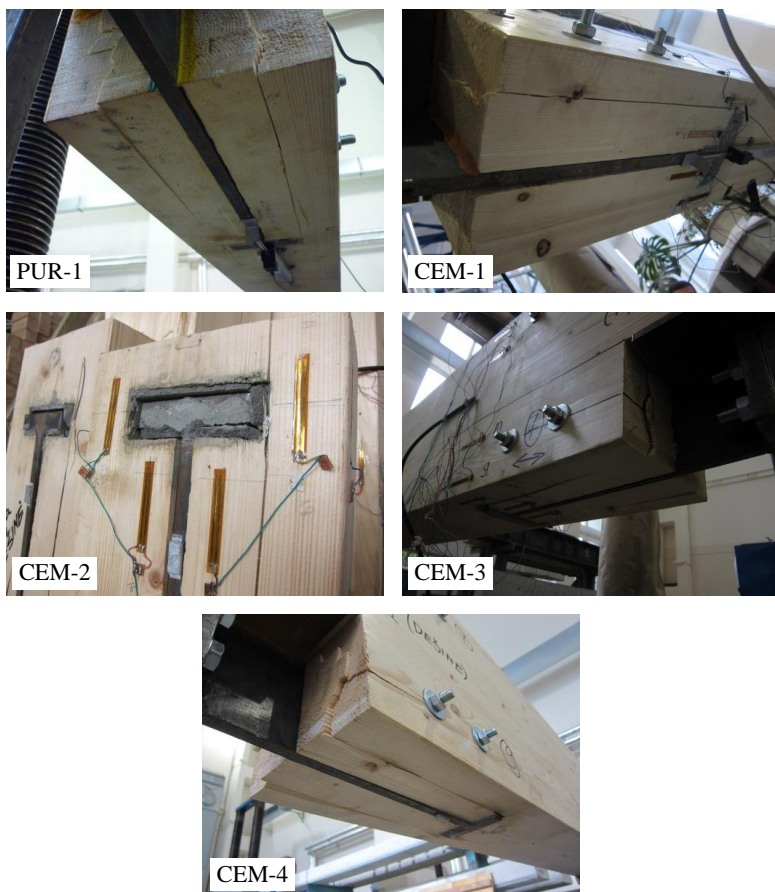
### 2.4.2. Bandinių irties pobūdžiai

Atliekant laboratorinius eksperimentus mazgai buvo bandomi iki visiško suirimo, tai yra iki pasiekiamos maksimali apkrova ir jos reikšmė ima mažėti. Analizuojamo mazgo galimi irties pobūdžiai:

- medienos suglemžimas glaudaus sąlyčio su metaline detale vietoje (plieninės detalės inkaravimo medienoje srityje);
- medienos nutrūkimas silpniausioje likutinėje skerspjuvio srityje;
- medienos nuskėlimas dėl šlyties ir tempimo skersai medienos pluošto įtempių sąveikos;
- užpildo irtis – suglemžimas ar nutrūkimas;
- plieninės išilginės detalės trūkis ar kluptis tempiamojoje ar gniuždomojoje mazgo zonos be galinių plokštelių sulenkimas;
- varžtų trūkis.

Eksperimentiškai tiriant jungtis visų bandinių irties pobūdis buvo tas pats, tai yra medienos bloko nuskėlimas dėl šlyties tempiamojoje mazgo srityje (2.15 paveikslas). Ši mazgo irtis medienoje įvyko dėl šlyties ir tempimo skersai medienos pluošto įtempių sąveikos. 2.15 paveiksle pateikiamuose bandiniuose, kurie suiro dėl medienos šlyties, ryškiai pastebimas medienos suirimo pobūdis, tai yra ryškiai matomos medienos skilimo plokštumos. Medienai skylant išilgai pluošto irtis įvyksta staigiai, prieš irimą medienoje nepastebimos ryškios plastinės deformacijos. Tai, kad medienoje nepasireiškia plastinės deformacijos, rodo jungties apatinėje tempiamojoje srityje sumontuoti tiesiniai poslinkių jutikliai (2.10 paveikslas), kurie fiksavo deformacijas iki pat mazgo irties.

Po suirimo apžiūrėjus bandinius, ypatingai medienos glaudaus sąlyčio sritį su plienine detale, pastebėtos suglemžtos medienos sritys. Mazgo eksperimentinę laikomąją galią, kuri būtų grindžiama medienos glemžimu glaudaus sąlyčio su plienine detale srityje, nustatyti sudėtinga; tokiu atveju būtina matuoti vien tik medienos glemžiamąsias deformacijas ir fiksuoti, ar jų dydis neviršija 1,5 mm pagal LST EN 380 reikalavimus. Tirtu atveju jungties tempiamojoje srityje tik irimo metu buvo pastebėtos didesnės nei 1,5 mm (iki 1,68 mm) tempiamosios srities deformacijų reikšmės, kaip pateikiama 2.10 paveiksle. CEM-2 bandinyje normalinių įtempių, nustatytų 50 mm atstumu nuo glaudaus sąlyčio su plienine detale srityje, reikšmė yra 22,23 MPa. Įtempių dydis nurodo, kad irtis dėl glemžimo šiame bandinyje nebuvo pasiekta iki medienai skylant išilgai pluošto, kadangi vėliau eksperimentiškai nustatyto medienos gniuždomojo stiprio mažiausia reikšmė buvo 42,9 MPa.



**2.15 pav.** Mazgų eksperimentinis irties pobūdis – medienos nuskėlimas jungties tempiamojoje srityje

**Fig. 2.15.** Experimental collapse form: timber shear in the tension zone of the connection

### 2.4.3. Medienos fizinės ir mechaninės savybės

Atlikus pagrindinius mazgų keturių taškų lenkimo eksperimentus, šalia suirimo vietos mediniame elemente išpjaunami bandiniai medienos fizinėms ir mechaninėms savybėms nustatyti: medienos gniuždomajam stipriui išilgai pluošto  $f_{c,0}$  ir gniuždomajam tamprumo moduliui  $E_{c,0}$  pagal LST EN 408:2010 standartą bei medienos tankiui ir drėgniui pagal ISO 3130 (1975). Medienos tankio ir drėgnio tyrimams iš kiekvienos tirtos jungties išpjaunama 20 vienetų bandinių, kurių

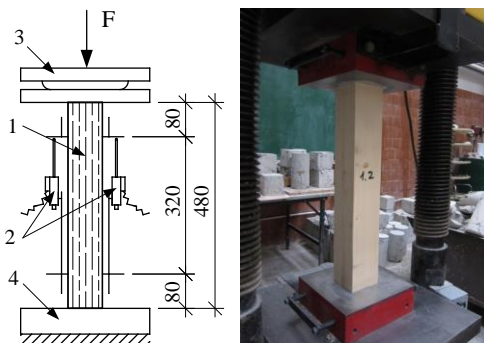


matmenys 50x50x50 mm. Medienos drėgniui nustatyti naudojamas svorinis džiovavimo metodas.

Medienos gniuždomasis stipris išilgai medienos pluošto  $f_{c,0}$  ir gniuždomasis tamprumo modulis  $E_{c,0}$  nustatomi pagal 2.16 paveiksle pateikiamą schemą. Išpjaunami bandiniai, kurių matmenys yra 80x80x480 mm, tai yra pagal LST EN 408:2010 standartą reglamentuojami elemento matmenys medienos gniuždomajam stipriui ir tamprumo moduliui nustatyti. Pagal standartą bandinys turi būti konstrukcinių matmenų, o ilgis turi būti ne mažesnis nei šeši mažesniosios kraštinės ilgiai. Viduriniajame ruože, kurio ilgis yra keturis kartus didesnis nei skerspjūvio kraštinė, matuojamos bandinio deformacijos gniuždomajam tamprumo moduliui nustatyti. Gniuždomasis tamprumo modulis apskaičiuojamas iš regresinės analizės būdu gautosios tiesės, atitinkančios deformacinės jėgos kreivės tampriąją dalį, taškų pagal išraišką (LST EN 408:2010):

$$E_{c,0} = \frac{l_1 \cdot (F_2 - F_1)}{b \cdot h \cdot (w_2 - w_1)}, \quad (2.1)$$

čia  $l_1$  – ruožas, kuriame matuojamos bandinio deformacijos;  $b$ ,  $h$  – bandinio skerspjūvio aukštis ir plotis;  $F_1$ ,  $F_2$  – apkrovos reikšmės, atitinkančios koreliacinės-regresinės analizės metu gautos tiesės taškus;  $w_1$ ,  $w_2$  – deformacijų reikšmės esant  $F_1$ ,  $F_2$  apkrovų reikšmėms.



**2.16 pav.** Medienos gniuždomojo stiprio ir tamprumo modulio nustatymo schema: 1 – medinis elementas; 2 – poslinkių jutikliai; 3 – presas; 4 – atrama

**Fig. 2.16.** Determination of the compressive timber strength and compressive modulus of elasticity: 1 – timber element, 2 – deformation indicator, 3 – loading machine, 4 – support

Nustatant medienos gniuždomąjį stiprį išilgai medienos pluošto, bandinys apkraunamas iki irimo. Irtis bandinyje turi įvykti per 300 s ( $\pm 120$  s). Pasiekus

maksimalią apkrovos reikšmę, gniuždomasis stipris išilgai medienos pluošto nustatomas pagal išraišką (LST EN 408:2010):

$$f_{c,0} = \frac{F_{\max}}{b \cdot h} . \quad (2.2)$$

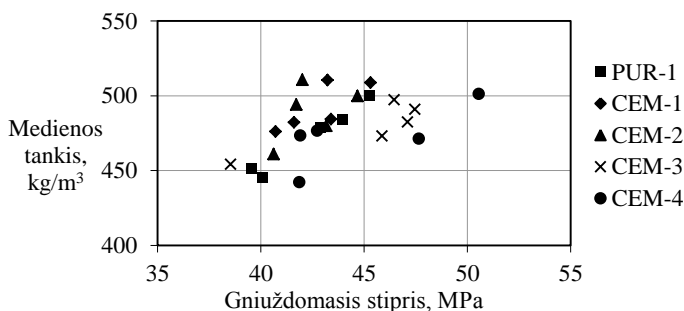
Eksperimentų metu gautos medienos fizinių ir mechaninių savybių vidutinės reikšmės pateikiamos 2.3 lentelėje.

**2.3 lentelė.** Eksperimentiškai nustatytos medienos fizinės ir mechaninės savybės

**Table 2.3.** Experimentally determined timber physical and mechanical properties

Bandinys	$f_{c,0}$ , MPa	$E_{c,0}$ , MPa	$\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	w, %
PUR-1	51,7	11 687	492	12
CEM-1	42,9	11 308	492	12
CEM-2	43,1	11 665	470	12
CEM-3	43,2	11 243	479	12
CEM-4	46,3	11 754	468	12

2.3 lentelėje pateikiamos savybės naudojamos mazgų skaitiniuose eksperimentuose bei teoriniuose laikomosios galios bei sukamojo standžio skaičiavimuose. Medienos tankis turi sąryšį su medienos gniuždomuoju ir skeliamuoju stipriais. Medienos tankio ir gniuždomojo stiprio išilgai medienos pluošto sąryšis pateikiamas 2.17 paveiksle.



**2.17 pav.** Medienos tankio ir gniuždomojo stiprio sąryšis

**Fig. 2.17.** Timber density-compressive strength dependence

Medienos tankis susiejamas su medienos vietiniu glemžiamuoju stipriu kaištinių jungčių skaičiavimuose pagal LST EN 1995-1-1 (2005). Medienos tankio ir šlyjamąjo stiprio sąveiką nagrinėja daug mokslininkų, kadangi tankis turi tiesioginį poveikį medienos skeliamajam stipriui (Steiger ir Gehri 2011, Kazuhiro *et al.* 2010).

## 2.5. Antrojo skyriaus išvados

1. Eksperimentiniai tyrimai leido nustatyti tiriamo mazgo iš medienos ir metalo lenkiamąją galią  $M_{j,R,exp}$ , pradinį sukamąjį standį  $S_{j,ini,exp}$ , normalinius įtempius medienos paviršiuje bei glaudžios medienos, metalo ir užpildo sąlyčio srities deformacijos jungties tempiamojoje ir gniuždomojoje dalyse.
2. Lyginant vienodų geometrinių parametų jungtis, kuriose panaudojamas cementinio pagrindo užpildas (bandiniai CEM-2, CEM-3, CEM-4), lenkiamosios galios ir sukamųjų standžių rezultatų sklaida yra labai maža, atitinkamai 4,7 % ir 5,2 %. CEM-1 bandinio laikomoji galia ir sukamasis standis yra apytikriai 23 % mažesni nei kitų analogiškų parametų mazgų dėl pastebėtų išilginių technologinių džiūvimo plyšių jungties tempiamojoje zonoje. Bandinio PUR-1 (su poliuretano užpildu) eksperimentinė laikomoji galia ir sukamasis standis yra atitinkamai 13,6 % ir 34,7 % didesni nei analogiškų jungčių su cementiniu užpildu vidurkis. Skirtumas susidaro dėl to, kad poliuretaninis užpildas geba perimti tempiamuosius įtempius, kurių dydis yra iki 25 MPa.
3. Pagrindinis eksperimentinis bandinių irties pobūdis – tai medienos bloko, kuris inkaruoja plieninę detalę, irtis dėl šlyties išilgai medienos pluošto bei tempimo skersai medienos pluošto įtempių sąveikos.
4. Eksperimentiniai mazgų bandymai trumpalaikę apkrova parodė, kad skirtingi užpildai (dviejų komponentų poliuretaninis ir cementinis su mikro fibromis) gali būti naudojami kaip tarpas tarp medienos ir metalo užpildanti ir glaudžią sąveiką užtikrinanti medžiaga tiriamo tipo mazguose. Galimas minimalus ir maksimalus, atitinkamai 2 ir 8 mm, užpildo storis leidžia eliminuoti gamybos netikslumus gaminant jungtis. Panaudojant skirtingus užpildus pastebima skirtinga elgsena glaudaus sąlyčio tarp medienos ir metalo srityje.
5. Eksperimentinių tyrimų rezultatai panaudojami skaitiniam analizės modeliui sudaryti bei teoriniams lenkiamosios galios ir sukamojo standžio skaičiavimams pagrįsti.



---

## Pusiau standaus mazgo skaitinė analizė

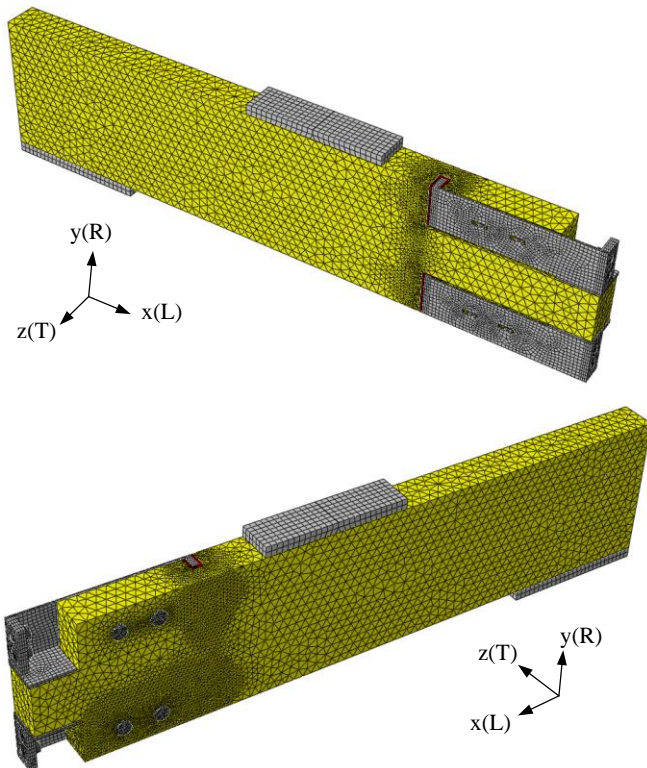
Šiame skyriuje pateikiama disertacijoje analizuojamo pusiau standaus mazgo iš medienos ir metalo analizė naudojant baigtinių elementų metodą. Detaliai aprašomi naudojami medžiagų modeliai bei skirtingi sąveikos tarp medienos, metalo ir užpildo tipai. Analizė atliekama naudojant baigtinių elementų programinį paketą ABAQUS. Vienas iš pagrindinių mazgų tyrimų baigtinių elementų metodu tikslų yra gauti realią mazgo elgseną atitinkantį tūrinį modelį, kuriuo būtų galima nustatyti analizuojamo tipo mazgų lenkiamąją galią ir sukamąjį standį. Skyriaus pabaigoje pateikiami skirtingų modelių skaičiavimo rezultatai bei gauto modelio pritaikymas mazgo skaičiavimuose keičiant geometrinius parametrus.

Skyriaus tematika paskelbta viena mokslinė publikacija (Gečys *et al.* 2015).

### 3.1. Tiriamo mazgo analizės modelis naudojant programinį paketą ABAQUS

Analizuojamas mazgas yra lanksčiai atremtos dviejų atramų 3,20 m sijos viduryje, analogiškai kaip antrajame disertacijos skyriuje pateikiamuose eksperimentiniuose mazgų tyrimuose, rezultatams palyginti. 3.1 paveiksle pateikiamas analizuojamo mazgo baigtinių elementų modelis, sudalintas tūriniais baigtiniais ele-

mentais. Analizuojamo mazgo konstrukcija bei kraštinės sąlygos yra simetriškos x-y ir y-z plokštumų atžvilgiu, tad analizuojama tik 1/4 viso mazgo, siekiant optimizuoti laiko sąnaudas, skirtas skaičiavimams baigtinių elementų programiniu paketu atlikti. Mediena modeliuojama naudojant 4 taškų tetraedro pavidalo baigtinius elementus ir taikant tampriai plastinės ortotropinės medžiagos modelį. Plieninės detalės ir plieniniai varžtai modeliuojami naudojant 8 taškų prizmės pavidalo tūrinius elementus ir taikant tampriai plastinės izotropinės medžiagos modelį. Užpildui aprašyti naudojami tokie patys elementai kaip ir plieninėms detalėms, tačiau medžiagos modelis yra tamprus tiesinis. Montuojamieji ir konstrukciniai varžtai su veržlėmis ir poveržlėmis yra modeliuojami kaip vientisiniai elementai. Varžtams nesuteikiama pradinio įtempimo jėga, kadangi naudojami paprastieji varžtai be pradinio įtempimo. Apkrovos pridėjimo vietose bei atramose naudojamos plieninės atraminės plokštelės, kurios taip pat įtraukiamos į baigtinių elementų modelį. Atraminės plokštelės aprašomos analogiškai kaip ir plieninės jungiamosios detalės.



**3.1 pav.** Mazgo iš medienos ir metalo tūrinis baigtinių elementų modelis  
**Fig. 3.1.** The 3D finite element model of timber-steel connection

Kaip buvo minėta, mediena analizuojama kaip ortotropinė medžiaga, kurios savybės išilgai ir skersai medienos pluošto atžvilgiu yra skirtingos. Taikomas ortotropinės tamprios, idealiai plastinės medžiagos modelis, kuriame savybės radialine (R) ir tangentine (T) kryptimis yra vienodos. 3.1 lentelėje pateikiamos medienos fizinės savybės naudojamos baigtinių elementų modelyje. Tamprumo modulis išilgai medienos pluošto  $E_L$  nustatytas atlikus laboratorinius eksperimentus, kitos savybės apskaičiuojamos remiantis ankstesniais autorių medienos mechaninių savybių tyrimais bei pateikiamu tankio ir gniuždomojo stiprio sąryšiu (Franke 2008, Dorn 2012, Eberhardsteiner 2002).

**3.1 lentelė.** Eksperimentiškai nustatytos medienos fizinės ir mechaninės savybės  
**Table 3.1.** Experimentally determined timber physical and mechanical properties

$E_L$ , MPa	$E_R = E_T$ , MPa	$\nu_{RT}$	$\nu_{LR} = \nu_{LT}$	$G_{RT}$ , MPa	$G_{LR} = G_{LT}$ , MPa
11 587	510	0,538	0,00894	161	316

Modeliuojant baigtiniais elementais naudojamos eksperimentiškai nustatytos medienos mechaninės savybės: gniuždomasis stipris  $f_{c,0,PUR} = 51,7$  MPa (bandiniai su poliuretaniniu užpildu PUR) ir  $f_{c,0,CEM} = 44,2$  MPa (bandinių su cementiniu užpildu CEM vidurkis). Medienos savybės gniuždant išilgai ir skersai pluošto pasižymi plastine elgsena, tačiau tempiant ir šlyjant paprastai nepastebimos plastinės deformacijos, irtis įvyksta staigiai. Norint sukurti universalų medžiagos modelį, atitinkantį realią medienos elgseną, šios dvi skirtingos medienos savybės turi būti sujungiamos viename modelyje. Medienos plastiškumui aprašyti panaudojama Hill (1948) funkcija, kitaip vadinamas Hilo irties kriterijus (Abaqus documentation 2012), kuriuo remiantis ortotropinėje medžiagoje gali būti pasiekiami takumo įtempiai ir deformacijos. Hill funkcija – tai tiesiog papildyta Von Mises funkcija, kuri yra užrašoma išraiška (Abaqus documentation 2012, Hill 1948):

$$f(\sigma) = \sqrt{F(\sigma_{RR} - \sigma_{TT})^2 + G(\sigma_{TT} - \sigma_{LL})^2 + H(\sigma_{LL} - \sigma_{RR})^2 + 2L\sigma_{RT}^2 + 2M\sigma_{TL}^2 + 2N\sigma_{LR}^2}, \quad (3.1)$$

3.1 išraiškoje koeficientai  $F G H L M N$  yra nustatomi išraiškomis:

$$F = \frac{(\sigma^0)^2}{2} \left( \frac{1}{\bar{\sigma}_{TT}^2} + \frac{1}{\bar{\sigma}_{LL}^2} + \frac{1}{\bar{\sigma}_{RR}^2} \right), \quad (3.2)$$

$$G = \frac{(\sigma^0)^2}{2} \left( \frac{1}{\bar{\sigma}_{TT}^2} + \frac{1}{\bar{\sigma}_{LL}^2} - \frac{1}{\bar{\sigma}_{RR}^2} \right), \quad (3.3)$$

$$H = \frac{(\sigma^0)^2}{2} \left( \frac{1}{\bar{\sigma}_{LL}^2} + \frac{1}{\bar{\sigma}_{RR}^2} - \frac{1}{\bar{\sigma}_{TT}^2} \right), \quad (3.4)$$

$$L = \frac{3}{2} \left( \frac{\tau_0}{\bar{\sigma}_{RT}} \right)^2, \quad (3.5)$$

$$M = \frac{3}{2} \left( \frac{\tau_0}{\bar{\sigma}_{LT}} \right)^2, \quad (3.6)$$

$$N = \frac{3}{2} \left( \frac{\tau_0}{\bar{\sigma}_{LR}} \right)^2, \quad (3.7)$$

čia  $\bar{\sigma}_{ij}$  – takumo įtempių reikšmė  $ij$  kryptimi;  $\sigma_{ij}$  – veikiantys įtempiai  $ij$  kryptimi;  $\sigma^0$  – atskaitinė įtempių reikšmė ir  $\tau^0 = \sigma^0 / \sqrt{3}$ .

Hilo funkcija neįvertina skirtumo tarp medžiagos tempiamojo ir gniuždomojo stiprių tiek išilgine, tiek skersine linkmėmis (Hill 1948). Pagal šią funkciją medienoje takumas pasiekiamas, kai 3.1 išraiškos reikšmė yra lygi 1,0. Medienos takumo įtempių reikšmės, naudojamos baigtinių elementų modelyje, yra pateikiamos 3.2 lentelėje. Kaip jau buvo minėta, medienos gniuždomasis stipris išilgai pluošto  $f_{c,0}$  (lygus  $\bar{\sigma}_{LL}$  3.1 išraiškoje) buvo nustatytas eksperimentiškai mazgams su poliuretaniu ir cementiniu užpildais. Kitos medienos takumo reikšmės pateikiamos 3.2 lentelėje, kurios buvo nustatytos remiantis medienos gniuždomojo stiprio išilgai pluošto ir tankio bei drėgnio sąryšiais, pateikiamais ankstesniuose mokslininkų Steiger ir Gehri 2011 darbuose.

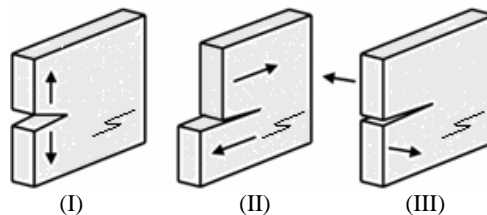
**3.2 lentelė.** Medienos takumo reikšmės naudojamos Hilo funkcijoje

**Table 3.2.** Yield properties of timber used in Hill function

Mazgas	$\bar{\sigma}_{LL}$ , MPa	$\bar{\sigma}_{RR} = \bar{\sigma}_{TT}$ , MPa	$\bar{\sigma}_{LR} = \bar{\sigma}_{LT}$ , MPa	$\bar{\sigma}_{RT}$ , MPa
PUR tipo užpildas	51,7	5,8	5,8	3,8
CEM tipo užpildas	44,2	5,0	5,0	3,3



Medienos elgsenai tempiant bei šlyjant aprašyti baigtinių elementų metodu gali būti taikomi keli metodai, tai yra atitinkamiems baigtiniams elementams ar sąveikaujančioms plokštumoms priskiriant koheazines savybes (angl. *cohesive properties*). Šiai medienos elgsenai aprašyti pasirenkamas metodas, kai savybės yra priskiriamos sąveikaujančiai plokštumai, šiuo atveju medienos skilimo plokštumai. Skilimo plokštuma tai yra medienos teorinio skilimo plokštuma jungtyje, kurioje tikimasi maksimalių šlyties ir tempimo skersai medienos pluošto įtempių. Standumui analizuojamoje plokštumoje aprašyti priskiriami standumo koeficientai  $K_{nn} = K_{ss} = K_{tt} = 300000 \text{ MPa}$ , užtikrinantys medienos analizuojamos plokštumos vientisumą. Indeksai *nn*, *ss*, *tt* nurodo pagrindines analizuojamos plokštumos kryptis, atitinkamai normalinę (statmeną medienos pluošto kryptčiai); tangentinę (plokštumą, sutampančią su medienos pluošto kryptimi) ir *ss* statmeną tangentinei plokštumai. Analizuojamojoje plokštumoje trintis nėra vertinama, tai yra laikoma, kad slinktis tarp plokštumų įvedant trinties koeficiento reikšmę  $\mu = 1,0$  nevyksta. Medienos irimui aprašyti dėl šlyties ir tempimo skersai medienos pluošto, pritaikomi trys klasikinės skilimo mechanikos (angl. *linear elastic fractures mechanics*) medžiagos irties pobūdžiai (Serrano 2000, Aicher ir Klock 2001, Anderson 2005, Kohler 2007, Dietenberger *et al.* 1999, Falk *et al.* 2010): dėl tempimo statmenai medienos pluoštui (I pobūdis); dėl šlyties plokštumoje, lygiagrečioje medienos pluoštui (II pobūdis); dėl šlyties statmenoje medienos pluoštui plokštumoje (II-I pobūdis), kaip pateikiama 3.2 paveiksle (Falk *et al.* 2010).



**3.2 pav.** Trys galimi medienos irties pobūdžiai dėl šlyties ir tempimo skersai medienos pluošto (Falk *et al.* 2010)

**Fig. 3.2.** The three possible failure modes in timber due to the shear and tension perpendicular to the grain (Falk *et al.* 2010)

Medienoje staigus irimas gali įvykti viršijus vieną iš šių įtempių reikšmių: tempimo skersai medienos pluošto  $\sigma_{t,90}$ ; šlyties išilgai medienos pluošto  $\tau_v$ ; šlyties statmenoje medienos pluoštui plokštumoje  $\tau_{v,90}$ ; arba esant šių įtempių bendrai sąveikai. Modeliuojant baigtinių elementų programiniu paketu pritaikomi du skirtingi medienos irimo kriterijai, tai yra maksimalaus įtempio kriterijus (3.8 išraiška) ir kelių įtempių sąveikos kriterijus (3.9 išraiška) pagal Steiger ir Gehri (2010) bei Aicher ir Klock (2001) pateikiamas išraiškas:

$$\max \left\{ \frac{\sigma_{t,90}}{f_{t,90}}, \frac{\tau_v}{f_v}, \frac{\tau_{v,90}}{f_{v,90}} \right\} = 1,0, \quad (3.8)$$

$$\left( \frac{\sigma_{t,90}}{f_{t,90}} \right)^2 + \left( \frac{\tau_v}{f_v} \right)^2 + \left( \frac{\tau_{v,90}}{f_{v,90}} \right)^2 = 1,0, \quad (3.9)$$

čia  $f_{t,90}$  – tempiamasis medienos stipris statmenai pluoštui, MPa;  $f_v$  – šlyjamasis medienos stipris lygiagrečiai medienos pluoštui, MPa;  $f_{v,90}$  – šlyjamasis medienos stipris statmenoje medienos pluoštui plokštumoje, MPa. Paminėtų medienos stiprių reikšmės, naudojamos baigtinių elementų modelyje, yra lygios  $f_{t,90} = 0,59$  MPa;  $f_v = 3,97$  MPa;  $f_{v,90} = 2,65$  MPa. Šios reikšmės yra nustatytos remiantis ankstesniais kitų autorių medienos mechaninių savybių tyrimais (Serrano 2004, Dorn 2012, Eberhardsteiner 2002). Baigtinių elementų programa sudarytame mazgo modelyje iirtis dėl medienos šlyties ar sąveikos tarp šlyties ir tempimo skersai medienos pluošto yra fiksuojama, kai 3.8 ar 3.9 išraiškos pasiekia reikšmę, lygią 1,0 visoje analizuojamojoje plokštumoje.

Plieninėms detalėms ir varžtams taikomas tampriai plastinės medžiagos modelis su savybėmis  $E_s = 210000$  MPa ir  $\nu = 0,30$ . Plieninėms detalėms ir varžtams taikomas skirtingas įtempių ir deformacijų sąryšis, kuris pateikiamas 3.3 lentelėje.

### 3.3 lentelė. Plieninių detalių ir varžtų įtempių ir deformacijų sąryšis

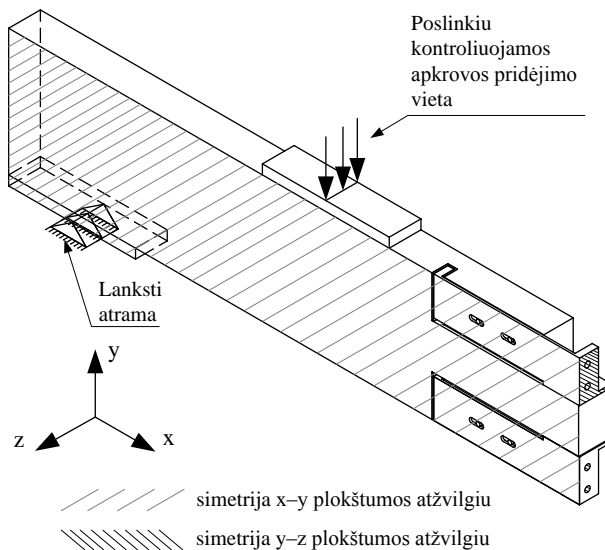
**Table 3.3.** Stress-strain dependences for steel details and steel bolts

Takumo įtempiai plieninėje detalėje, MPa	Santykinės plastinės deformacijos	Takumo įtempiai varžtuose, MPa	Santykinės plastinės deformacijos
275	0	640	0
400	0,06	800	0,12

Mazgų eksperimentai baigtinių elementų metodu atliekami naudojant du skirtingus užpildus, aptartus ankstesniame laboratorinių eksperimentinių tyrimų skyriuje. Užpildai aprašomi taikant tamprios medžiagos modelį su savybėmis: tamprumo moduliui  $E_{CEM} = 20000$  MPa ir  $E_{PUR} = 4000$  MPa bei šlyties moduliui  $\nu_{CEM} = \nu_{PUR} = 0,20$ . Užpildams taikomas tamprios medžiagos modelis, kadangi stipriai pagal gamintojų deklaruojamas gniuždomojo stiprio reikšmės yra didesnės nei medienos gniuždomojo stiprio reikšmės, tad medžiagos netiesiškumas mazgo elgsenai poveikio neturi.

Aprova tiriamam mazgui suteikiama poslinkiu vertikalia y linkme, kaip parodyta 3.3 paveiksle. Mazgo baigtinių elementų modelyje atraminės plokštės

taip pat modeliuojamos siekiant tiksliai atspindėti natūralią apkrovimo schemą. 3.3 paveiksle taip pat pateikiamos ir modeliui suteiktos x-y ir y-z simetrijos plokštumos bei lanksti atrama. Suteikus simetrijos sąlygas x-y plokštumoje, visi taškai esantys šioje plokštumoje, gali pasislinkti x-y kryptimis bei pasisukti apie z ašį. Suteikus simetrijos sąlygas y-z plokštumoje, visi joje esantys taškai gali pasislinkti y-z plokštumoje, tačiau pasisukti apie x ašį negali.

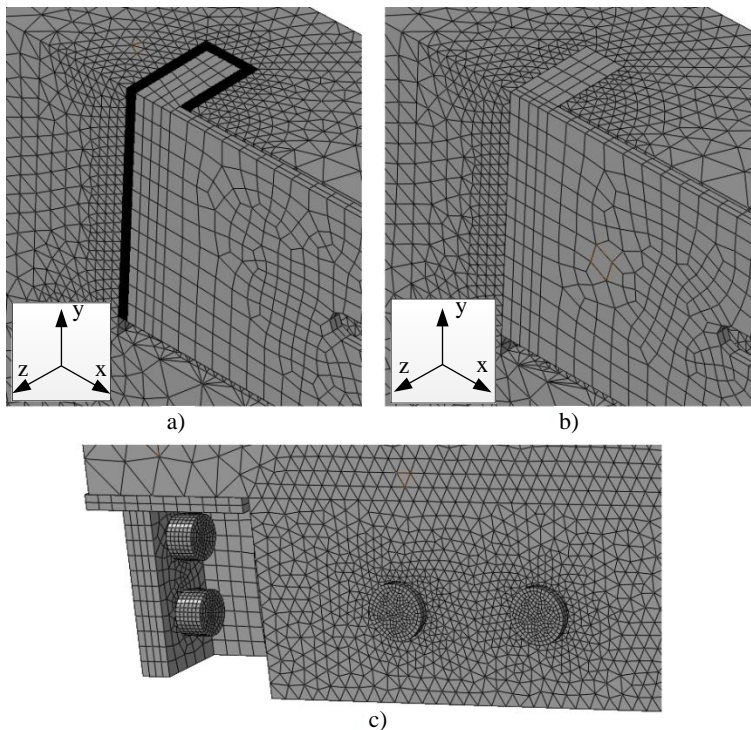


**3.3 pav.** Mazgo keturių taškų lenkimo skaitinis eksperimentas: x-y (šviesiai pilka) ir y-z (tamsiai pilka) simetrijos plokštumos

**Fig. 3.3.** Four-point bending test of the connection using finite elements: symmetry plane in x-y (light grey) and symmetry in y-z (dark grey)

Siekiant tiksliai aprašyti analizuojamą mazgą baigtinių elementų metodu, priskiriami keli skirtingi sąveikos tipai tarp atskirų sąveikaujančių medžiagų – medienos elemento, plieninės detalės, užpildo bei varžtų (3.4 paveikslas). Vienas iš skaitinio modelio parametrų analizės tikslų yra nustatyti užpildo poveikį bendrai jungties elgsenai: kai mediena ir plieninė detalė sąveikauja panaudojant užpildą (3.4 paveikslas a) ir kai mediena sąveikauja su plienine detaile tiesiogiai (3.4 paveikslas b). Tiksliai sąveikai tarp medienos ir užpildo aprašyti (3.4 paveikslas a) panaudojamas tvirto (angl. *tie surface to surface contact*) tipo kontakto priskyrimas, kuris plokštumą tarp šių medžiagų sujungia į vientisą. Mazgui deformuojantis medžiagos išlieka sąveikoje visą laiką, nevyksta plokštumų atskyrimas bei trintis tarp jų. Šio tipo kontaktas taip pat yra priskiriamas ir sąveikai tarp plieninių varžtų ir plieninės detalės bei konstrukcinių varžtų ir medienos (3.4 paveikslas c). Sąveikai tarp plieninės detalės ir užpildo (3.4 paveikslas a) bei

plieninės detalės ir medienos (3.4 paveikslo b) aprašyti panaudojamas kito tipo kontaktas – bendrai plokštumai tarp šių medžiagų priskiriamos savybės, leidžiančios paviršiams skverbtis vienas į kitą, tai yra priskiriamas pagrindinis (angl. *master*) ir šalutinis (angl. *slave*) paviršiai. Esant šiam sąveikos tipui tarp sąveikaujančių medžiagų taip pat gali atsiverti tarpas. Tangentine linkme sąveika įvertinama įvedus trinties koeficientą, kuris yra lygus sąveikai tarp užpildo ir metalo  $\mu = 0,45$  bei tarp medienos ir metalo  $\mu = 0,65$ . Šios reikšmės nustatomos priartėjimo būdu analizuojant skirtingas trinties koeficiento reikšmes intervale 0,3–0,8.



**3.4 pav.** Baigtinių elementų metodu analizuojamo mazgo sąveikos tarp skirtingų elementų fragmentai: a) plieninė detalė, užpildas ir mediena; b) plieninė detalė ir mediena; c) konstrukciniai varžtai ir mediena

**Fig. 3.4.** Different types of interaction between different materials:

a) steel detail-filler-timber, b) steel detail-timber, c) constructive bolts-timber

Siekiant gauti skaitinei analizei tinkamą modelį, kuriuo remiantis galima būtų nustatyti reikiamų matmenų mazgo lenkiamąją galią ir sukamąjį standį, nustatomas atskirų mazgo parametrų poveikis. Šiam tikslui pradžioje atliekama sąveikaujančių plokštumų parametrinė analizė, kurios metu eliminuojamos

mazgo elgsenai poveikio neturinčios sąveikos plokštumos. Atliekami skaičiavimai priimant sąveiką kontakto zonoje tarp medienos, metalo ir užpildo, kai paviršiai sąveikauja tik x linkme bei x ir y vienu metu (ašys pagal 3.4 paveikslo a ir b). Taip pat nustatoma konstrukcinių varžtų, naudojamų medienos skersinėms deformacijoms suvaržyti mazgo tempiamojoje zonoje, bei skirtingų savybių užpildų poveikis. Visi parametriniai skaičiavimo baigtinių elementų metodu modeliai pateikiami 3.4 lentelėje.

**3.4 lentelė.** Baigtinių elementų modelių suvestinė

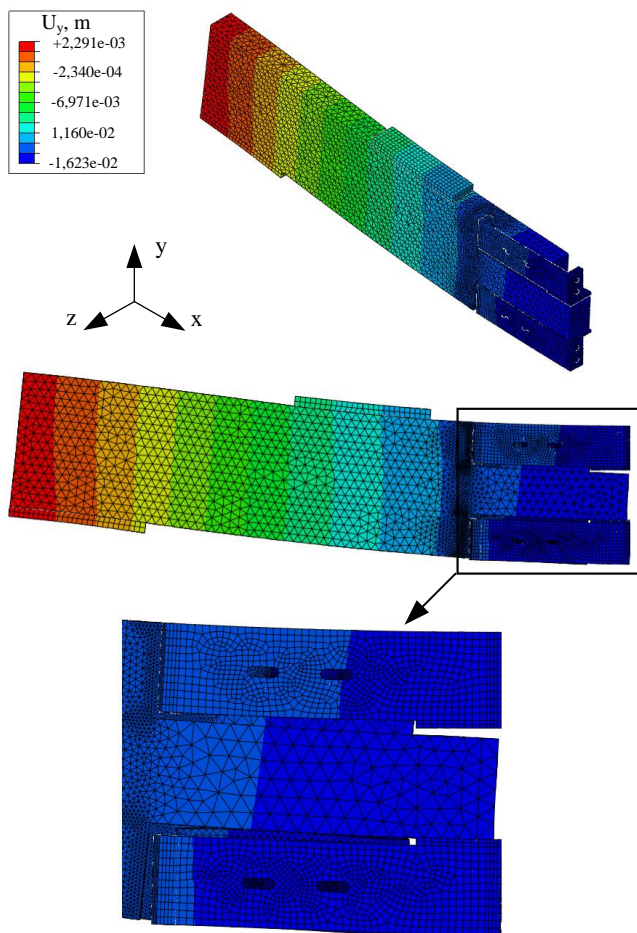
**Table 3.4.** Summary of different finite element models

Modelio pavadinimas	Užpildas	Varžtai medienos skersinėms deformacijoms suvaržyti	Medienos takumo stiprio reikšmės	Sąveikos tipas		
				A	B	C
MS-KV	–	+	MS	+	–	–
MS	–	–	MS	+	–	–
DS-KV	–	+	DS	+	–	–
DS	–	–	DS	+	–	–
MS-CEM-KV	CEM	+	MS		+	+
MS-CEM	CEM	–	MS		+	+
DS-PUR-KV	PUR	+	DS		+	+
DS-PUR	PUR	–	DS		+	+
MS-PUR-KV	PUR	+	MS		+	+
MS-PUR	PUR	–	MS		+	+

3.4 lentelėje pateikiami skirtingų modelių aprašymo parametrai: „užpildas“ – apibrėžia, kokio tipo užpildas buvo taikomas analizuojamame modelyje (cementinis CEM ar poliuretaninis PUR), ar modelis yra analizuojamas be užpildo (–); „varžtai medienos skersinėms deformacijoms suvaržyti“ – apibrėžiama, kuriame modelyje buvo naudojami konstrukciniai varžtai ir kuriuose modeliuose jų sąveikos nepaisoma (modelių pavadinimuose konstrukciniai varžtai pažymimi KV); „medienos takumo stiprio reikšmės“ – apibrėžiama, kurios medienos stiprio takumo reikšmės buvo naudojamos modelyje (CEM – eksperimentiškai tirtų mazgų su cementiniu užpildu vidurkis, kuris pažymimas trumpiniu MS (mažesnis stipris); PUR – naudojant bandinio su poliuretaniniu užpildu medienos stiprio reikšmę, kuri pažymima trumpiniu DS (didesnis stipris)); „sąveikos tipas“: A – tiesioginė sąveika tarp plieninės detalės ir medienos nenaudojant užpildo (3.4 paveikslo b); B – sąveika tarp medienos ir užpildo (3.4 paveikslo a) bei C – tai sąveika tarp plieninės detalės ir užpildo (3.4 paveikslo a).

### 3.2. Mazgų modeliavimo baigtinių elementų programiniu paketu rezultatai bei jų validumas

Pagrindinis šių tyrimų, baigtinių elementų metodu naudojant programinį paketą ABAQUS, tikslų yra gauti analizei tinkamą mazgo modelį, kuriuo remiantis būtų galima nustatyti reikiamų geometrinių ir fizinių parametrų mazgo lenkiamąją galią ir sukamąjį standį. Baigtinių elementų mazgo modelio tikslumas grindžiamas laboratoriniais eksperimentais, tad tolimesni rezultatai palyginami su gautais eksperimentų metu.

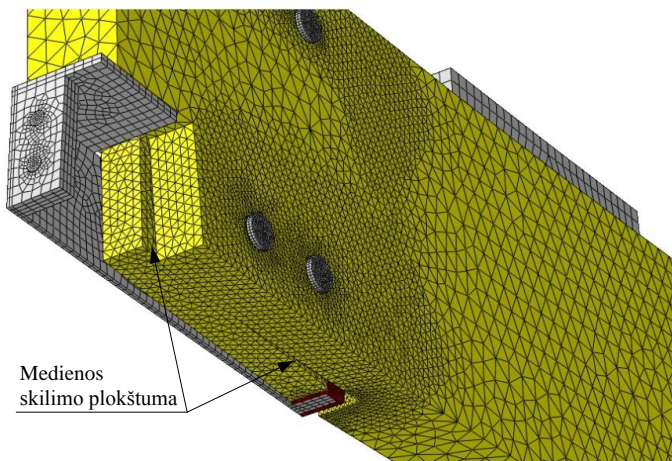


**3.5 pav.** Analizuojamo baigtinių elementų mazgo modelio MS-KV deformuotas būvis irimo metu

**Fig. 3.5.** Deformed scheme of the finite element model MS-KV

3.5 paveiksle pateikiamas vieno iš analizuojamų mazgų modelio MS-KV deformuotas būvis. Veikiant apkrovai analizuojamame mazge gali būti pasiekti įvairūs irties pobūdžiai, kurie plačiai aptarti ankstesniuose skyriuose pateikiant tiriamo mazgo konstrukcijos aprašymą.

Atliekant tiriamo mazgo analizę baigtinių elementų metodu, kaip ir eksperimentinių tyrimų metu, mazgo irties pobūdis – tai medienos skilimas išilgai pluošto dėl šlyties bei tempimo skersai medienos pluošto įtempių sąveikos. Mazgo irties pobūdis, gautas modeliuojant baigtiniais elementais, pateikiamas 3.6 paveiksle. Šiame paveiksle ryškiai matomos išilginės medienos skilimo plokštumos, nuskeliamas medienos blokas jungties tempiamojoje srityje.

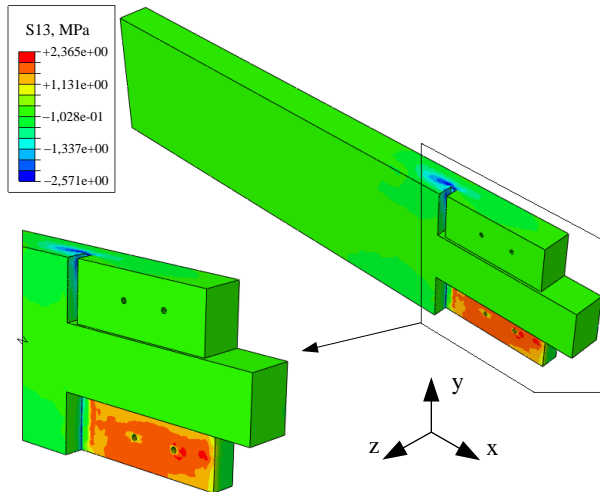


**3.6 pav.** Analizuojamo mazgo irties pobūdis analizuojant baigtinių elementų metodu – medienos skilimas išilgai pluošto

**Fig. 3.6.** The failure mode of the connection using finite element method: timber shear in the tension zone of the connection

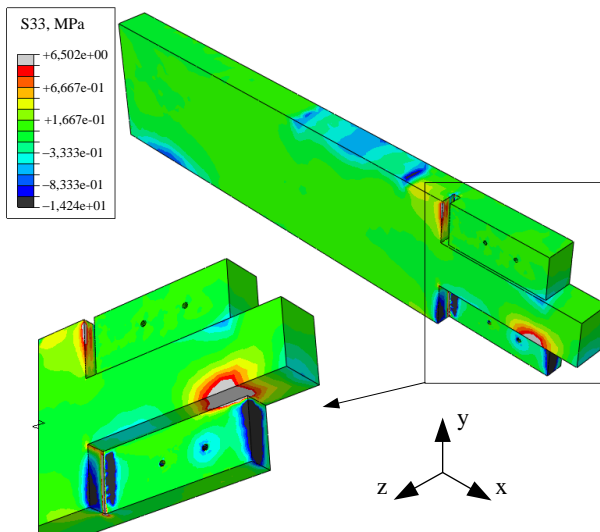
Medienos bloko, kuris inkaruoja plieninę detalę, irtis įvyksta, kai visoje skeliamojame plokštumoje stiprumo kriterijaus reikšmė tampa lygi 1,0 pagal 3.8 ir 3.9 išraiškas. Skaičiavimai buvo atliekami taikant tiek 3.8, tiek 3.9 išraiškas, tačiau visais atvejais mazgo irtį nulėmė 3.9 išraiškoje pateikiamas stiprumo kriterijus, tai yra esant kelių įtempių bendrai sąveikai. 3.7 ir 3.8 paveiksluose pateikiami modelio MS-KV šlyties išilgai medienos pluošto įtempiai  $S_{13}$  (atitinka ašis  $xz$ ) ir tempimo skersai medienos pluoštui įtempiai  $S_{33}$  (atitinka  $z$  ašį). Kaip pavaizduota 3.7 paveiksle, šlyties įtempiai  $S_{13}$  (atitinka  $xz$  ašis) irimo metu pasiskirsto tolygiai visame medienos šlyjamajame plote. Šlyties įtempių maksimali reikšmė yra 2,365 MPa, o tai yra mažiau nei aprašytas medienos šlyjamasis stipris  $f_v = 3,97$  MPa. Aptartoji sąlyga rodo, kad medienos irimas šioje skerspjuvio vietoje įvyksta dėl šlyties įtempių ir tempimo skersai medienos pluošto įtempių

sąveikos. Šlyjamieji įtempiai S13 taip pat susidaro ir skerspjūvio viršuje, mazgo gniuždomojoje zonoje, kurių reikšmė yra 2,571 MPa. Ši įtempių reikšmė labai artima apačioje susidarančių įtempių reikšmei.



**3.7 pav.** Medienos šlyties įtempiai S13

**Fig. 3.7.** The shear stresses S13 in the timber element



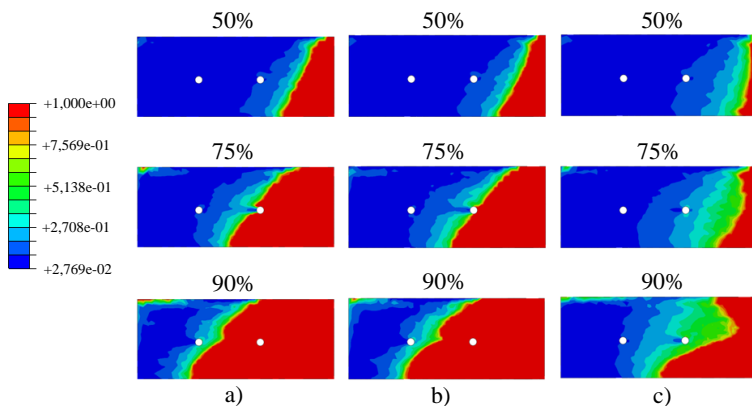
**3.8 pav.** Medienos įtempiai S33 skersai pluošto

**Fig. 3.8.** The stresses S33 in timber perpendicular to the grain



Tempimo įtempiai skersai medienos pluošto S33 (atitinka z ašį) pateikiami 3.8 paveiksle. Neanalizuojant pavienių elementų, kuriuose įtempiai susikongcentruoja, maksimalūs įtempiai susidaro medienos šlyties plokštumos galuose, tai yra glaudaus sąlyčio su plienine detale vietoje, ir šlyties plokštumos gale, ties laisva briauna.

3.9 paveiksle vaizduojamas irimo kriterijaus plitimas analizuojamojoje medienos skilimo plokštumoje esant skirtingiems apkrovos lygiams (50 %, 75 % ir 90 %). Palyginimui pasirenkami trys skirtingi modeliai: MS-KV, MS-CEM-KV ir DS-PUR-KV, kurių aprašymas pateikiamas 3.4 lentelėje.

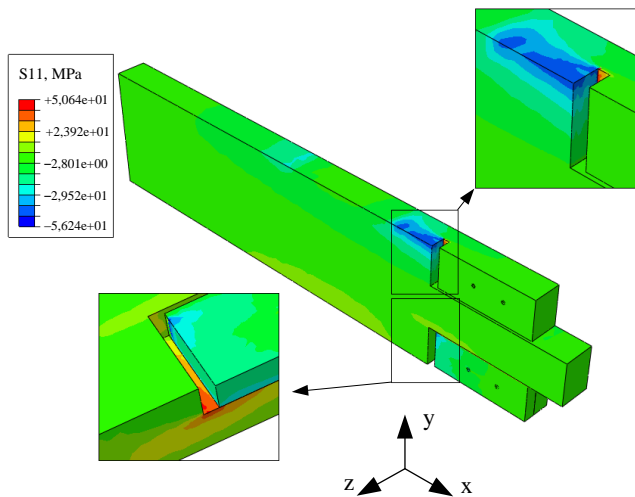


**3.9 pav.** Medienos irties kriterijaus reikšmės esant skirtingiems apkrovos lygiams: a) MS-KV; b) MS-CEM-KV; c) DS-PUR-KV

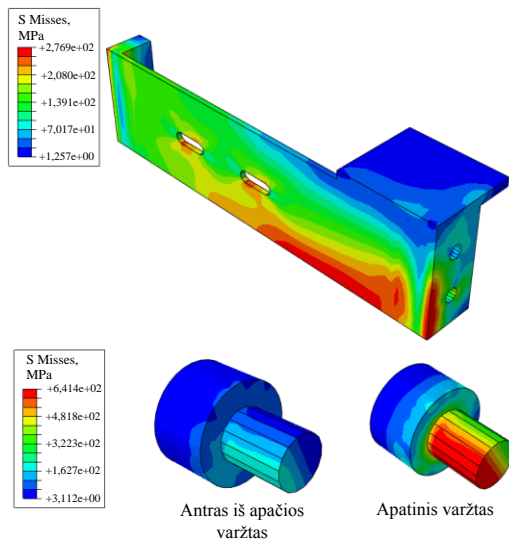
**Fig. 3.9.** The failure criterion initiation at the different load levels:  
a) MS-KV, b) MS-CEM-KV, c) DS-PUR-KV

Kitas mazgo irties pobūdis gali būti medienos suglemžimas glaudaus sąlyčio su plienine detale ar užpildu srityje. Šiam tikslui matuojamos medienos, plieninės detalės ir užpildo deformacijos galinės T pavidalo plokštelės inkaravimo medienoje srityje. Šiose srityse galimas medienos takumo įtempių pasireiškimas, kuris fiksuojamas naudojant aukščiau aptartą Hilo funkciją. 3.10 paveiksle pateikiami gniuždymo ir tempimo išilgai medienos pluošto įtempiai S11 (atitinka ašį x). Įtempių reikšmės rodo, kad tiek mazgo viršuje, tiek apačioje, glaudaus sąlyčio su mediena srityje, susidaro medienos takumo įtempiai. Šie įtempiai medienoje pradeda formuotis, kai mazge pasiekama apytikriai 85 % laikomošios galios. Šie takumo įtempiai yra lokalūs ir, kaip rodo toliau pateikiamos apkrovos ir deformacijų kreivės, bendrai mazgo elgsenai poveikio neturi, tai yra nepastebimas nevaržomas poslinkio didėjimas prie atitinkamos pastovios apkrovos reikšmės.

Mazgo apatinėje zonoje, tempimo veikiamoje plieninėje detalėje ir tempiamuosiuose varžtuose susidarantys von Mises įtempiai pateikiami 3.11 paveiksle. Matyti, kad plieninėje detalėje atskirose zonose pasiekiami takumo įtempiai 275 MPa. Plieninėms detalėms sujungti panaudojami 8.8 stiprumo klasės varžtai, kuriuose dalyje skerspjūvio susidaro 641,4 MPa įtempiai.



**3.10 pav.** Įtempiai medienoje S11  
**Fig. 3.10.** Stresses S11 in the timber



**3.11 pav.** von Mises įtempiai plieninėje detalėje ir varžtuose  
**Fig. 3.11.** Misses stresses in the steel detail and bolts

3.5 lentelėje pateikiama modeliavimo baigtinių elementų metodu rezultatų suvestinė.

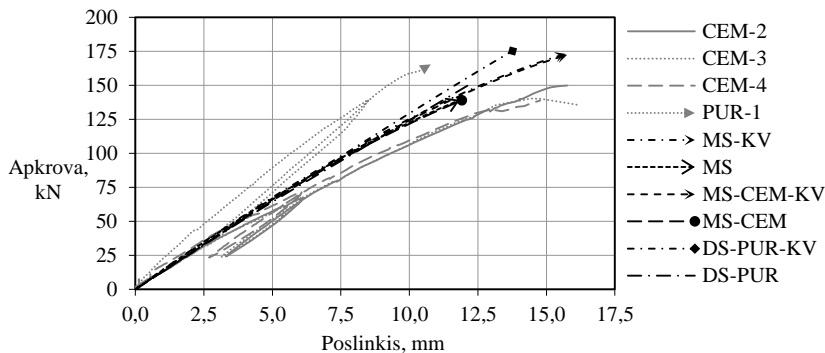
**3.5 lentelė.** Baigtinių elementų modelių stiprumo ir standžio skaičiavimo rezultatai  
**Table 3.5.** Moment resistance and rotational stiffness determined by FEM

Bandinys	$M_{j,R,FEM}$ , kNm	$S_{j,ini,FEM}$ , kNm/rad	$u$ , mm	$u_C$ , mm	$u_T$ , mm
MS-KV	69,32	6975	15,70	1,62 <sup>a</sup>	0,48 <sup>a</sup>
MS	69,18	6975	15,58	1,53 <sup>b</sup>	0,21 <sup>b</sup>
DS-KV	55,75	7027	11,84	1,11 <sup>a</sup>	0,35 <sup>a</sup>
DS	56,59	7028	12,07	1,08 <sup>b</sup>	0,16 <sup>b</sup>
MS-CEM-KV	68,96	6782	15,76	1,70 <sup>a</sup>	0,50 <sup>a</sup>
MS-CEM	55,60	6674	11,92	1,15 <sup>a</sup>	0,34 <sup>a</sup>
DS-PUR-KV	70,12	6726	13,77	1,04 <sup>b</sup>	0,29 <sup>b</sup>
DS-PUR	70,33	6867	13,13	0,99 <sup>b</sup>	0,29 <sup>b</sup>
MS-PUR-KV	60,34	6801	12,21	0,97 <sup>b</sup>	0,27 <sup>b</sup>
MS-PUR	61,26	6832	11,76	0,94 <sup>b</sup>	0,25 <sup>b</sup>

3.5 lentelės žymėjimai:  $M_{j,R,FEM}$  – mazgo lenkiamoji galia, nustatyta baigtinių elementų modelių;  $S_{j,ini,FEM}$  – pradinis sukamasis standis;  $u$  – centrinio mazgo taško vertikalus poslinkis;  $u_C$  – gniuždomosios deformacijos medienos ir metalo sąlyčio srityje;  $u_T$  – tempiamosios deformacijos medienos ir metalo sąlyčio srityje; <sup>a</sup> – deformacijos, nustatytos esant 80 mm matavimo bazės ilgiui; <sup>b</sup> – deformacijos, nustatytos esant 50 mm matavimo bazės ilgiui.

3.12 paveiksle pateikiamos eksperimentinių tyrimų ir modeliavimo baigtiniais elementais metu gautos apkrovos ir centrinio mazgo taško poslinkio kreivės. Lenkiamojo momento ir pasisukimo kreivės nėra pateikiamos, kadangi savo charakteriu jos atkartoja apkrovos ir poslinkio kreives. Toliau lyginant rezultatus bandinio CEM-1 rezultatai nenaudojami, kadangi bandymo metu buvo pastebėtas išilginis džiūvimo įtrūkis, kuris nulėmė ženklų lenkiamosios galios ir standžio sumažėjimą. Iš 3.12 paveiksle pateikiamų apkrovos ir poslinkio kreivių matyti, kad modeliai be užpildo ir panaudojant cementinį užpildą, kuriuose iš analizės pašalinami konstrukciniai varžtai medienos apspaudimui (modeliai MS ir MS-CEM), rodo gerą sąryšį su eksperimentinių tyrimų metu gautomis lenkiamosiomis galiomis bei standžiais (CEM-2, CEM-3, CEM-4). Modeliuojant baigtiniais elementais gaunama 2,6 % mažesnė lenkiamoji galia palyginti su vidutine eksperimentinių tyrimų reikšme. Modeliavimo baigtiniais elementais pradinis

sukamasis standis yra 21 % didesnis nei gautas eksperimentinio tyrimo metu. Šis skirtumas gali būti grindžiamas tuo, kad baigtinių elementų modelyje visi sąveikaujantys paviršiai yra idealiame sąlytyje, nėra jokių tarpų tarp sąveikaujančių mazgo elementų ir medžiagų. Modeliuose, kuriuose panaudojami ir konstrukciniai varžtai medienos apspaudimui (MS-KV ir MS-CEM-KV), gaunama 17 % didesnė lenkiamoji galia palyginti su eksperimentiniais tyrimais, tačiau sukamajam standžiui poveikio neturi.



**3.12 pav.** Apkrovos ir mazgo viduriniojo taško vertikalaus poslinkio kreivės

**Fig. 3.12.** Load-central point displacement curves

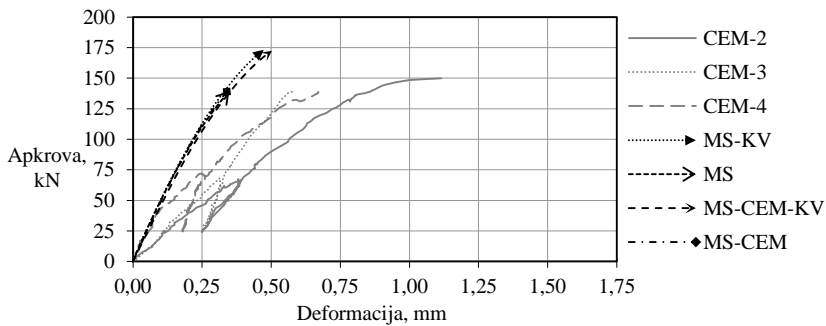
Modeliai, kuriuose nemodeliuojamas užpildas (MS-KV, MS), ir modeliai, kuriuose įvedamas cementinis užpildas (MS-CEM-KV, MS-CEM), yra vieno di, lyginant mazgų lenkiamąsias galias  $M_{j,R,FEM}$  bei deformacijas  $u$ ,  $u_T$  ir  $u_C$ . 3 % pradinio sukamojo standžio  $S_{j,ini,FEM}$  sumažėjimas pastebimas naudojant cementinį užpildą dėl sudėtingesnės medžiagų sąveikos galinės T pavidalo plokštelės srityje. Cementinis užpildas turi didelį standį ( $E_{CEM} \approx 2E_L$ ), tad bendrai mazgo elgsenai iš esmės poveikio neturi, ir elgsena pasiekama tokia pati, kaip ir nenaudojant užpildo, kai sąveika tarp plieno ir medienos vyksta tiesiogiai. Galima teigti, kad mazguose, kuriuose naudojamas cementinis užpildas, sąveikai aprašyti baigtinių elementų metodu užpildas gali būti nemodeliuojamas.

Iš analizės pašalinus konstrukcinius varžtus tarp modelių MS-KV ir MS bei atitinkamai MS-CEM-KV ir MS-CEM gaunamas 19,5 % laikomosios galios sumažėjimas. Šis skirtumas susidaro dėl to, kad modeliuose, kuriuose nenaudojami konstrukciniai varžtai medienos skersinėms deformacijoms suvaržyti, gaunami didesni tempimo skersai medienos pluošto įtempiai. Tempimo skersai medienos pluošto įtempiai medienoje atsiranda dėl necentrinio medinio elemento gniuždymo mazgo tempiamojoje zonoje glaudaus medienos ir plieninės detalės sąlyčio srityje. Konstrukciniai varžtai medienos apspaudimui turi

didelį standumą palyginti su medienos standumu skersai medienos pluoštui ( $E_s \approx 400 \cdot E_{R,T}$ ). Analizės metu konstrukciniai varžtai perima medienoje atsirandančius tempimo įtempius skersai medienos pluošto, todėl dėl šių varžtų išvengiama pirmalaikio medienos skilimo. Lyginant 3.12 paveiksle pateikiamas kreives matyti, kad baigtinių elementų modelių kreivių posvyrio kampai yra identiški eksperimentinių bandymų metu gautiems po pirmojo apkrovimo ir nukrovimo ciklo.

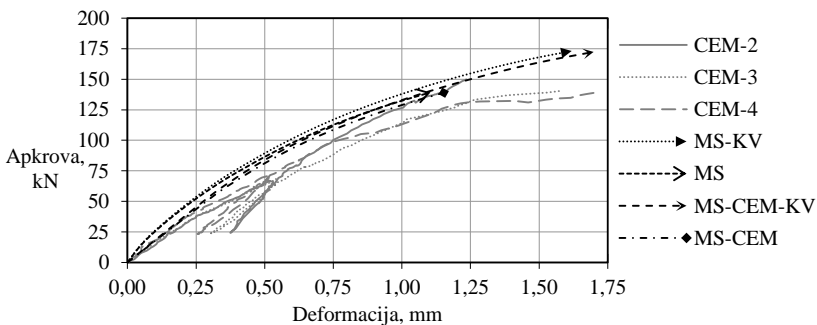
Apkrovos ir poslinkio kreivės atspindi kitokią bendrąją mazgų modelių su poliuretaniniu užpildu (DS-PUR-KV, DS-PUR) elgseną palyginti su eksperimentiniais bandymais PUR-1. Modelių, kuriuose panaudojamas poliuretaninis užpildas, lenkiamoji galia ir sukamieji standžiai yra didesni palyginti su cementinio užpildo modeliais. Tai iš dalies grindžiama didesnėmis medienos takumo stiprių reikšmėmis naudojant poliuretaninį užpildą. Poliuretaninio užpildo modelio, kuriame į analizę įtraukiami konstrukciniai varžtai medienai apspausti (DS-PUR-KV), lenkiamoji galia  $M_{j,R,FEM}$  yra 5,9 % didesnė nei eksperimentinė laikomoji galia PUR-1. Modelis DS-PUR-KV tiksliau reprezentuoja tikrąją mazgo elgseną palyginti su modeliu DS-PUR, kuriame konstrukciniai varžtai medienai apspausti nėra naudojami. Modelio DS-PUR lenkiamoji galia yra 8,9 % mažesnė nei gauta eksperimento metu. Modelių DS-PUR-KV ir DS-PUR pradiniai sukamieji standžiai yra 11,9 % ir 10,9 % mažesni nei eksperimentiškai nustatyto PUR-1. Konstrukcinių medienos apspaudimo varžtų (KV) poveikis lenkiamajai galiai ir sukamiesiems standžiams modelių su poliuretaniniu užpildu nėra tokia ryški kaip cementinio užpildo modeliams. Šio parametro poveikis mazgams su poliuretaniniu užpildu yra 20 % mažesnis palyginti su cementinio užpildo mazgų modeliais. Tempimo įtempių skersai medienos pluošto sumažėjimas sąlygoja bendrą mazgo lenkiamosios galios padidėjimą. Lyginant 3.12 paveiksle pateikiamas apkrovos ir poslinkio kreives matyti, kad mazgo PUR-1 sukamasis standis po pirmojo apkrovimo-nukrovimo ciklo yra 42 % didesnis nei pradinis, tad tai gali sąlygoti, kad medienos tamprumo modulio reikšmė faktiškai yra didesnė nei naudojama baigtinių elementų modeliuose DS-PUR-KV ir DS-PUR.

Sąveikos tarp medienos ir plieninės inkaruojamos detalės elgsenai nusakyti, 3.13–3.16 paveiksluose pateikiamos apkrovos ir deformacijų kreivės (atitinka 6, 7 ir 8, 9 tiesinius poslinkių jutiklius pagal 2.6 paveikslą), kurios kartu palyginamos su gautomis eksperimento metu. Deformacijos yra matuojamos medienos, užpildo ir plieninės detalės galinės T pavidalo plokštelės glaudaus sąlyčio srityje mazgo tempiamojoje ir gniuždomojoje zonose. 3.13–3.16 paveiksluose pateikiamos apkrovos ir deformacijų kreivės iki mazgo irties. Mazgo laboratoriniai eksperimentai atliekami esant 50 mm ir 80 mm deformacijų matavimo bazėms, atitinkamai mazgams su poliuretaniniu (PUR-1) ir cementiniu (CEM-2, CEM-3, CEM-4) užpildais.



**3.13 pav.** Apkrovos ir gniuždomosios zonos deformacijų (atitinka 6 ir 7 poslinkių jutiklius pagal 2.6 paveikslą) kreivės

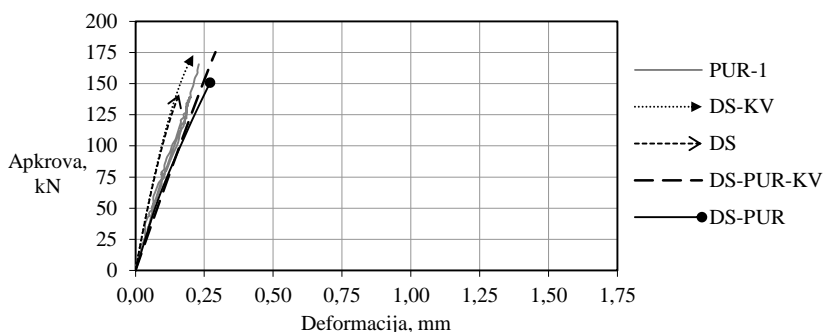
**Fig. 3.13.** Load-compressive deformation (6 and 7 deformation indicators according to Fig. 2.6.) curves



**3.14 pav.** Apkrovos ir tempiamosios zonos deformacijų (atitinka 8 ir 9 poslinkių jutiklius pagal 2.6 paveikslą) kreivės

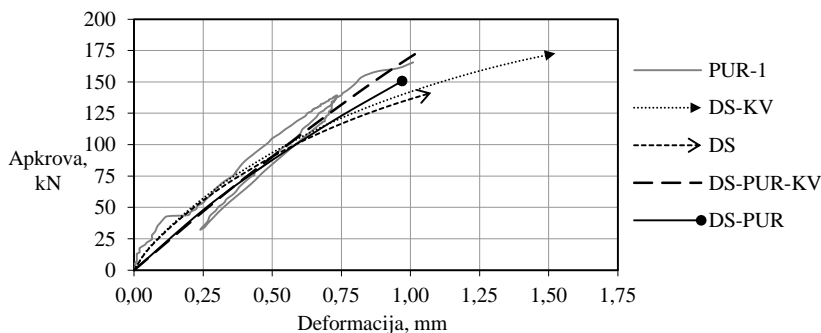
**Fig. 3.14.** Load-tension deformation (8 and 9 deformation indicators according to Fig. 2.6.) curves

Iš 3.13 paveikslo matyti, kad konstrukciniai varžtai, naudojami medienos skersinėms deformacijoms suvaržyti (KV), mazgo elgsenai gniuždomojoje zonoje poveikio neturi. Lyginant apkrovos ir deformacijų kreives po nukrovimo, matyti, kad kreivių posvyrio kampai yra labai panašūs skaitiniuose modeliuose ir eksperimento metu. 3.14 paveiksle pateikiamos mazgų su cementiniu užpildu apkrovos ir tempiamosios zonos deformacijų kreivės taip pat rodo, kad lokalią mazgo elgseną tempiamojoje srityje tiksliau apibūdina mazgų modeliai, kuriuose konstrukciniai varžtai medienai apspausti nėra įtraukiami į analizę (MS, MS-CEM).



**3.15 pav.** Apkrovos ir gniuždomosios zonos deformacijų (atitinka 6 ir 7 poslinkių jutiklius pagal 2.6 paveikslą) kreivės

**Fig. 3.15.** Load-compressive deformation (6 and 7 deformation indicators according to Fig. 2.6.) curves



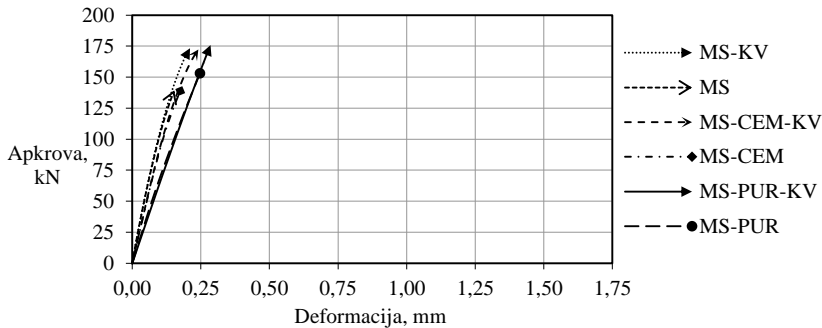
**3.16 pav.** Apkrovos ir tempiamosios zonos deformacijų (atitinka 8 ir 9 poslinkių jutiklius pagal 2.6 paveikslą) kreivės

**Fig. 3.16.** Load-tension deformation (8 and 9 deformation indicators according to Fig. 2.6.) curves

Paveikslai 3.15 ir 3.16 rodo, kad vietinis poslinkio modulis mazgų modeliuose be užpildo (DS-KV, DS) yra didesnis nei mazgų modeliuose, kuriuose įvedamas poliuretaninis užpildas (DS-PUR-KV, DS-PUR). Šį skirtumą nulemia santykinai mažas poliuretaninio užpildo tamprumo modulis  $E_{PUR} = 4000 \text{ MPa}$ , kuris yra apytikriai 2,3 karto mažesnis nei medienos tamprumo modulis  $E_L$ . Kaip ir mazgų modeliuose su cementiniu užpildu, mazguose su poliuretaniniu užpildu, mazgo modelio lokali elgsena gniuždomojoje ir tempiamojame zonose tiksliau aprašoma analizėje nenaudojant konstrukcinių varžtų medienai apspausti (DS ir DS-PUR).

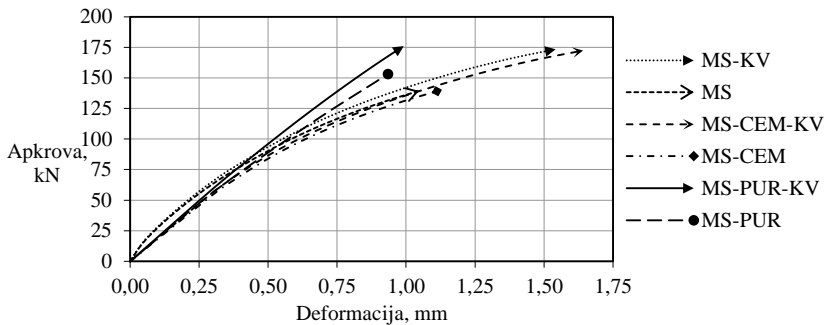
Siekiant nustatyti skirtingo naudojamo užpildo poveikį mazgo lokaliai elgsenai, mazgų modeliai DS-PUR-KV ir DS-PUR, kurie yra modeliuojami naudojant poliuretaninį užpildą (PUR-1), perskaičiuojami naudojant medienos takumo

stiprių reikšmes, kurios gautos mazgų eksperimentinių bandymų su cementiniu užpildu (CEM-2, CEM-3, CEM-4) metu, atitinkamai modeliai MS-PUR-KV ir MS-PUR. Mazgo lokali elgsena apibūdinama glaudžios sąveikos deformacijomis tarp medienos ir plieninės detalės, atitinkančiomis 6, 7, 8 ir 9 linijinių poslinkių jutiklius pagal 2.6 paveikslą. 3.17 ir 3.18 paveiksluose pateikiamos užpildo poveikio nustatymo modelių lokalsios tempiamosios ir gniuždomosios deformacijos naudojant vienodą 50 mm ilgio deformacijų matavimo bazę.



**3.17 pav.** Apkrovos ir gniuždomosios zonos deformacijų (atitinka 6 ir 7 poslinkių jutiklius pagal 2.6 paveikslą) kreivės

**Fig. 3.17.** Load-compressive deformation (6 and 7 deformation indicators according to Fig. 2.6.) curves



**3.18 pav.** Apkrovos ir tempiamosios zonos deformacijų (atitinka 8 ir 9 poslinkių jutiklius pagal 2.6 paveikslą) kreivės

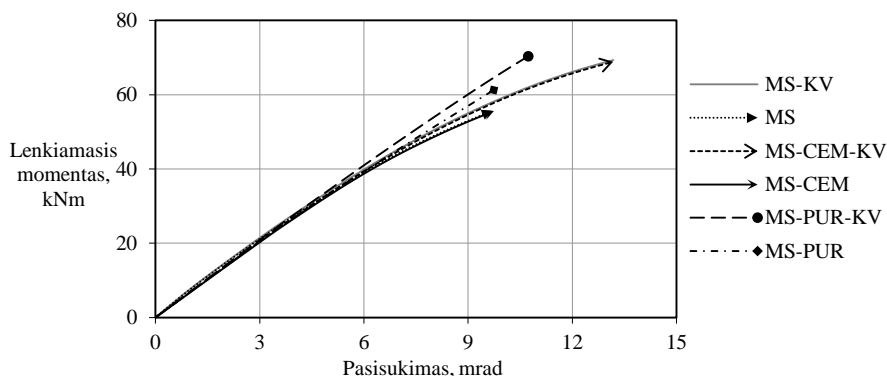
**Fig. 3.18.** Load-tension deformation (8 and 9 deformation indicators according to Fig. 2.6.) curves

Iš 3.17 ir 3.18 paveikslų matyti, kad mazgų modeliai, kuriuose nenaudojamas užpildas (MS-KV, MS) arba naudojamas cementinis užpildas (MS-CEM-KV, MS-CEM), esant vienodoms medienos takumo stiprių reikšmėms sukuria tvirtesnę sąveiką mazgo gniuždomojoje zonoje palyginti su poliuretaniniu užpil-



du (MS-PUR-KV, MS-PUR). Mazgo tempiamojoje zonoje, modeliuose, kuriuose nenaudojamas užpildas, o sąveika tarp medienos ir metalo yra tiesioginė, sukuriamas standesnis kontaktas palyginti su cementiniu ar poliuretaniniu užpildais (3.18 paveikslas). Jungties gniuždomojoje zonoje tai yra tiesiogiai susiję su medžiagos tamprumo modulio dydžiu. 3.15 paveikslas rodo, kad mazgų modeliuose be užpildo (MS-KV, MS), tempiamojoje zonoje gaunamas standesnis pradinis kontaktas, tačiau pasiekus apytikriai 42 % maksimalios apkrovos reikšmės, medienoje ties galine T pavidalo plokšte prasideda netiesinė elgsena, pasireiškia medienos takumo deformacijos ir įtempiai. 3.18 paveikslas atskleidžia, kad modeliuose panaudojant užpildus, medienoje įtempiai glaudaus sąlyčio su detale srityje yra perskirstomi ir takumo įtempiai medienoje pasireiškia apytikriai 7 % vėliau. Medienos skersinėms deformacijoms suvaržyti naudojamų konstrukcinių varžtų poveikis mazgų lokaliai elgsenai jungties tempiamojoje ir gniuždomojoje zonose, mazgų modeliams su cementiniu užpildu ir be užpildo yra labai panašus. Nenaudojant šių varžtų gaunamos apytikriai 1,37–1,47 karto didesnės deformacijos. Modeliavimo baigtiniais elementais rezultatai parodė, kad šio parametro poveikis daug mažesnis jungtims su poliuretaniniu užpildu, tai yra gaunamos 1,08–1,13 karto didesnės deformacijos.

Norint nustatyti užpildo poveikį mazgo sukamajam standžiui  $S_j$ , 3.19 paveiksle aukščiau aptartiems modeliams MS-KV, MS, MS-CEM-KV, MS-CEM, MS-PUR-KV, MS-PUR pateikiamos momento ir pasisukimo kreivės.



**3.19 pav.** Lenkiamojo momento ir pasisukimo kreivės esant skirtingiems mazgo baigtinių elementų modeliams

**Fig. 3.19.** Moment-rotation curves of different finite element models of the connection

3.19 paveiksle naudojamos vienodos medienos takumo stiprių reikšmės, gautos iš medienos su cementiniu užpildu eksperimentinių tyrimų. Pradinis sukamasis standis  $S_{j,ini,FEM}$ , siekiantis iki 40 % maksimalios lenkiamosios galios,

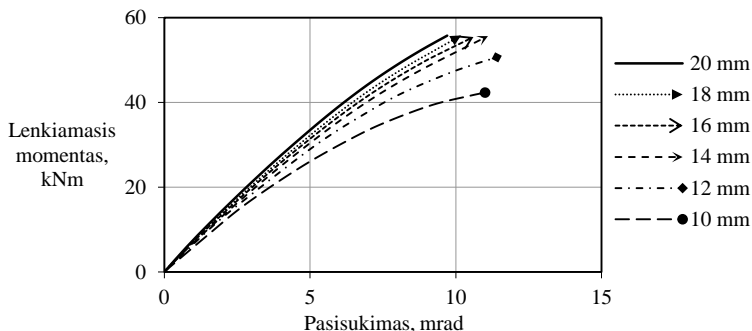
yra sąlyginai vienodas, tad užpildo savybės mazgo pradiniam sukamajam standžiui poveikio neturi.

Medienos takumo įtempiai naudojant Hilo funkciją anksčiau pasiekiami modeliuose, kuriuose nenaudojamas užpildas (MS-KV, MS), vėliau modeliuose, kuriuose naudojamas cementinis užpildas (MS-CEM-KV, MS-CEM), ir vėliau siai modeliuose su poliuretaniniu užpildu (MS-PUR-KV, MS-PUR). Iš 3.19 paveikslo matyti, kad mažesnio tamprumo modulio poliuretaninis užpildas leidžia labiau persiskirstyti gniuždomiesiems įtempiams medienoje glaudaus medienos ir plieninės detalės sąlyčio srityje. Įtempių persiskirstymas sąlygojo didesnius šlyties ir tempimo skersai medienos pluošto įtempius skeliamojoje medienos plokštumoje, kuri inkaruoja plieninę detalę medienos elemente (3.6 paveikslas). Konstrukcinių varžtų medienai apspausti poveikis bendrai mazgo elgsenai mazgų modeliams be užpildo (MS-KV, MS) ir naudojant cementinį užpildą (MS-CEM-KV, MS-CEM) yra vienodas, koks buvo aptartas aukščiau, vertinant mazgo lokaliąją elgseną gniuždomojoje ir tempiamojoje srityse. Konstrukcinių varžtų poveikis modeliams su poliuretaniniu užpildu yra santykinai mažesnis lyginant modelius MS-KV ir MS-PUR, tačiau didinant medienos takumo įtempių reikšmes, jų poveikis didėja.

Kaip buvo aptarta šiame skyriuje, pagrindinis analizuojamo mazgo irties pobūdis baigtinių elementų metodu, kaip ir laboratoriniuose eksperimentuose, yra medienos skilimas mazgo tempiamojoje srityje. Keičiant mazgo geometrinis parametrus, šiuo atveju galinės plokštelės storį, mazgo irties pobūdis keičiasi, tai yra iš trapios irties dėl medienos skilimo pereinama prie plastiško suirimo dėl medienos suglemžimo ar plieninės detalės sulenkimo. Sukurtu mazgo baigtinių elementų modeliui taip pat galima nustatyti plastinį irimą dėl plieno takumo įtempių pasireiškimo ar medienos suglemžimo. Šiam tikslui vienas iš baigtinių elementų modelių MS, tiksliai reprezentuojantis mazgo elgseną su cementiniu užpildu, modeliuojamas keičiant galinės T pavidalo inkaruojamos detalės storį. Modelio MS galinės T pavidalo plokštelės storis yra 20 mm. Papildomi skaičiavimai atliekami mažinant galinės plokštelės storį iki 10 mm. Mazgo lenkiamosios galios ir sukamojo standžio kitimas grafiškai pateikiamas 3.20 paveiksle. Šis paveikslas vaizduoja mazgo sukamojo standžio kitimą keičiantis galinės T pavidalo inkaruojamos detalės storiui. Esant 12 mm galinės plokštelės storiui dėl takumo įtempių bei plastinių deformacijų pasireiškimo plieninėse detalėse mazgo irties pobūdis iš trapiaus (dėl medienos skilimo) pereina prie tampriai-plastinio.

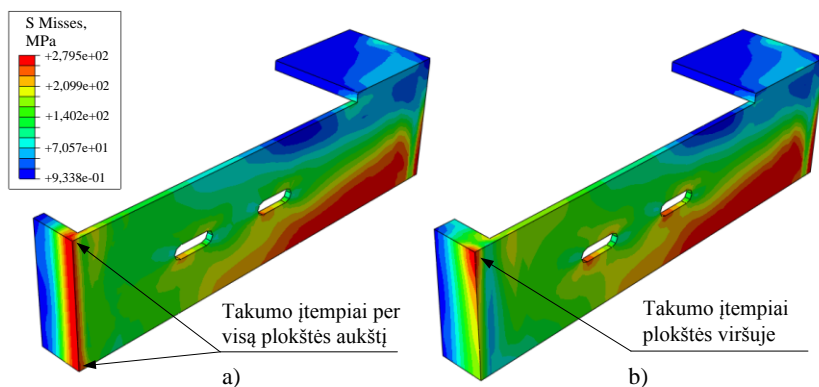
Plastinis mazgo irimas pasiekiamas, kai visame galinės plieninės T pavidalo plokštelės skerspjuvio aukštyje pasiekiami takumo įtempiai. 3.21 paveiksle pateikiami von Mises įtempiai plieninėje inkaruojamoje detalėje mazgo irimo metu. 3.20 paveiksle pateikiamos lenkiamojo momento ir pasisukimo kreivės at-

skleidžia, kad esant 10 ir 12 mm storio galinėms plokštelėms plieninėse detalėse pasireiškia takumo įtempiai.



**3.20 pav.** Lenkiamojo momento ir pasisukimo kreivės modelyje MS esant skirtingiems galinės T pavidalo plokštelės storiams

**Fig. 3.20.** Moment-rotation curves dependence of the back T-shaped plate thickness in the finite element model MS



**3.21 pav.** Įtempiai plieninėje detalėje esant skirtingiems galinės T pavidalo plokštelės storiams: a) 10 mm; b) 20 mm

**Fig. 3.21.** Stresses in the steel detail with different T-shaped back plate thicknesses: a) 10 mm, b) 20 mm

Glaudaus medinio elemento ir plieninės detalės sąlyčio srityje, medienos elementuose taip pat pastebimos plastinės deformacijos. Šis irties pobūdis pastebimas esant santykinai plonai galinei plokštei (10 ar 12 mm) ir apkrovimo metu jai deformuojantis. Galinei T pavidalo plokštei lenkiantis, mažėja medienos ir plieninės detalės efektyvusis sąlyčio plotas.

### 3.3. Trečiojo skyriaus išvados

1. Parengtas skaitinis baigtinių elementų mazgo modelis yra universalus, gebantis fiksuoti tiek irties pobūdį dėl medienos skilimo išilgai pluošto, tiek plastinį dėl plieno takumo ar medienos suglemžimo glaudaus sąlyčio su plienine detale srityje. Mazgo skaitinė analizė baigtinių elementų metodu keičiant galinės inkaruojamos T pavidalo plieninės detalės storį, parodė kaip pereinama nuo staigaus irimo iki plastinio, kai visame galinės plieninės plokštelės skerspjūvyje pasiekiami takumo įtempiai; medienos skėlimo plokštumoje buvo pasiekta tik apytikriai 72,8 % irties kriterijaus.
2. Hilo funkcijos pritaikymas leido aprašyti medienos tampriai plastinę elgseną gniuždant. Tiriamo mazgo modelio irtis dėl šlyties ir tempimo skersai medienos pluošto įtempių sąveikos, aprašyta taikant koheazines plokštumas, atitinka eksperimentinių tyrimų metu gautąją.
3. Mazgo analizės baigtinių elementų metodu rezultatų palyginimas su eksperimentiniais tyrimais parodė, kad jungties su cementiniu užpildu elgseną tiksliausiai atspindi modelis MS, kuriuo nustatyta mazgo lenkiamoji galia  $M_{j,R,FEM}$  yra apytikriai 2,6 % mažesnė nei gauta eksperimentinių tyrimų metu. Mazgo pradinis sukamasis standis  $S_{j,ini,FEM}$  yra iki 21 % didesnis nei gautas eksperimentinių tyrimų metu. Mazgo su poliuretaniu užpildu elgseną tiksliausiai atspindi modelis DS-PUR, kuriuo nustatyta mazgo laikomoji galia yra 9,8 % mažesnė nei gauta eksperimentinių tyrimų metu. Mazgo pradinis sukamasis standis yra 15,1 % mažesnis nei nustatytas eksperimentinių tyrimų metu.
4. Modeliuojant mazgus su cementiniu užpildu nustatyta, kad užpildas bendrai mazgo elgsenai poveikio neturi ir šio tipo mazgai gali būti modeliuojami priimant tiesioginį kontaktą tarp plieninės detalės ir medinio elemento, naudojant trinties koeficiento reikšmę  $\mu = 0,65$ .
5. Konstrukciniai varžtai, naudojami medienos skersinėms deformacijoms suvaržyti, sukamajam standžiui ženkliausio poveikio neturi – eliminuojant juos iš analizės (MS, MS-CEM, DS-PUR), pradinis sukamasis standis gaunamas toks pats kaip ir modeliuojant su jais (MS-KV, MS-CEM-KV, DS-PUR-KV). Mazgo lenkiamajai galiai šių varžtų poveikis yra didelis ir analizėje nevertinant šių varžtų gaunamas 16,2–23,3 % laikomosios galios sumažėjimas. Šis lenkiamosios galios sumažėjimas grindžiamas tuo, kad jungtyje nesant šiems varžtams tempiamojoje jungties dalyje, medienoje, atsiranda dideli papildomi tempimo skersai medienos pluošto įtempiai.

---

## Pusiau standaus mazgo iš medienos ir metalo stiprio ir standžio modeliavimas komponentų metodu

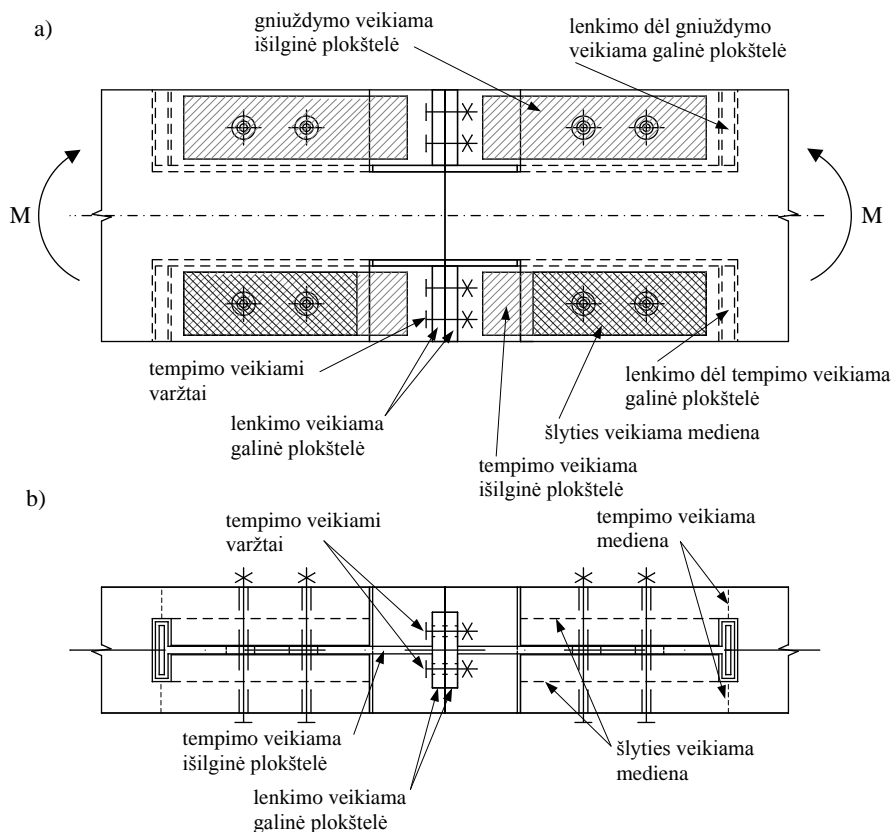
Šiame skyriuje pateikiamas komponentų metodo pritaikymas disertacijoje analizuojamo pusiau standaus mazgo iš medienos ir metalo lenkiamajai galiai ir sukamajam standžiui teoriškai nustatyti. Atskirų komponentų laikomosios galios ir standžio koeficientų išraiškos gautos naudojantis pateikiamomis plieninių konstrukcijų mazgams bei remiantis eksperimentinių tyrimų ir modeliavimo baigtiniais elementais rezultatais. Skyriaus pabaigoje pateikiamas pristatomo skaičiavimo algoritmo komponentų metodu praktinis pritaikymas mazgų skaičiavimams.

Skyriaus tematika paskelbta viena mokslinė publikacija (Gečys *et al.* 2015).

### 4.1. Bendrosios sąvokos bei aktyviųjų standžio ir stiprio komponentų išskyrimas

Ankstesniame skyriuje pateikiamo analizuojamo pusiau standaus mazgo iš medienos ir metalo, pritaikyto sijiniams elementams jungti, pradinis sukamasis standis  $S_{j,ini}$  ir lenkiamoji galia  $M_{j,Rd}$  priklauso nuo atskirų komponentų

standžio koeficientų reikšmių ir jų laikomųjų galių. Sudarant mazgo mechaninį modelį skaičiavimui komponentų metodu, plieninės dalies komponentų standžio koeficientai nustatomi pagal SLT EN 1993-1-8 pateikiamas išraiškas. Kai kurios iš šių išraiškų, skirtos kolonos pėdos sukamajam standžiui modeliuoti, pritaikomos plieninės detalės sąveikai su mediena aprašyti. Šių komponentų išraiškų tinkamumas pagrindžiamas eksperimentiniais tyrimais ir modeliavimu baigtinių elementų metodu. 4.1 paveiksle pateikiami tiriamo mazgo aktyvūs komponentai. Aktyvūs mazgo komponentai yra mazgo lenkiamajai galiai ir sukamajam standžiui poveikio turintys komponentai.



**4.1 pav.** Analizuojamo pusiau standaus mazgo aktyvūs komponentai:

a) vaizdas iš priekio; b) vaizdas iš apačios, apatinėje tempiamosioje srityje

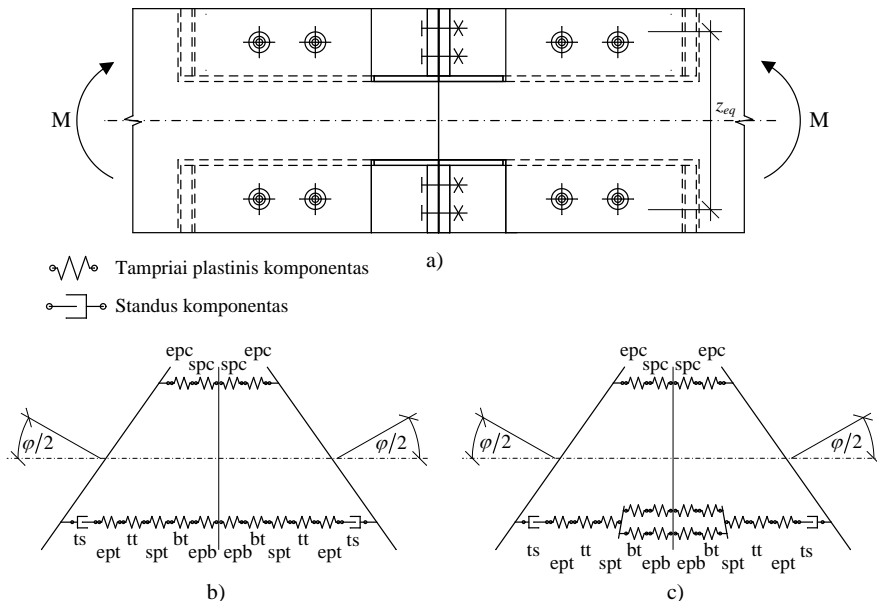
**Fig. 4.1.** Active components of the analysed timber-steel connection:

a) the front view, b) the view from above in the tension zone of the connection

Analizuojamame mazge išskiriami šie komponentai:

1. Lenkimo veikiamo galinė plokštelė jungties tempiamosioje dalyje (*epb*).
2. Tempimo veikiami varžtai mazgo tempiamosioje dalyje (*bt*).
3. Tempimo veikiamo išilginė plieninė plokštelė mazgo tempiamosioje dalyje (*spt*).
4. Lenkimo dėl tempimo veikiamo galinė T pavidalo inkaruojama plokštelė, apimant ir medienos gniuždymą mazgo tempiamosioje dalyje (*ept*).
5. Tempimo veikiamo mediena jungties tempiamosioje dalyje (*tt*).
6. Šlyties veikiamo mediena jungties tempiamosioje dalyje (*ts*).
7. Gniuždymo veikiamo išilginė plieninė plokštelė jungties gniuždomosioje dalyje (*spc*).
8. Lenkimo dėl gniuždymo veikiamo galinė T pavidalo inkaruojama plokštelė, apimant ir medienos gniuždymą jungties gniuždomosioje dalyje (*epc*).

Pagal elgsenos pobūdį išskiriami dviejų tipų komponentai, tai yra tampriai plastiniai, turintys poveikio tiek jungties sukamajam standžiui, tiek lenkiamajai galiai, ir standūs, turintys poveikio tik mazgo laikomajai galiai. Pateikus aktyvius komponentus, sudaromas mazgo mechaninis modelis, pateikiamas 4.2 paveiksle.



**4.2 pav.** Analizuojamo pusiau standaus mazgo mechaninis modelis:

- a) mazgo vaizdas iš priekio; b) esant vienai tempiamų varžtų eilei;
- c) esant dviem tempiamų varžtų eilėms

**Fig. 4.2.** Mechanical model of the connection: a) front view of the connection, b) models with one tension bolt row, c) model with two tension bolt rows

Mazgo lenkiamajai galiai poveikį turi visi 8 aukščiau išvardinti komponentai. Jungties sukamajam standžiui turi poveikį visi, išskyrus šlyties veikiamą medieną, kadangi šlyties veikiamoje medienoje ( $k_{ts}$ ) irtis įvyksta staigiai, nepasireiškiant plastinėms deformacijoms. 4.2 paveiksle pateikiamas analizuojamo mazgo mechaninis modelis, kuriame išskiriami tampriai plastiniai ir standūs mazgo komponentai. Pateikiami du skirtingi modeliai, esant vienai tempiamų varžtų eilei ir dviem varžtų eilėms.

## 4.2. Mazgo lenkiamosios galios nustatymas

Mazgo iš klijuotosios medienos ir metalo, panaudojant varžtinę jungtį su galinėmis plokštelėmis, lenkiamoji galia  $M_{j,Rd}$  nustatoma pagal 6.25 išraišką, pateikiamą LST EN 1993–1–8 (2005):

$$M_{j,Rd} = \sum_{i=1}^{n_r} h_r \cdot F_{tr,Rd}, \quad (4.1)$$

čia  $F_{tr,Rd}$  – efektyvioji skaičiuotinė  $r$  varžtų eilės tempiamoji galia;  $h_r$  –  $r$  varžtų eilės atstumas iki gniuždymo centro;  $r$  – varžtų eilės numeris.

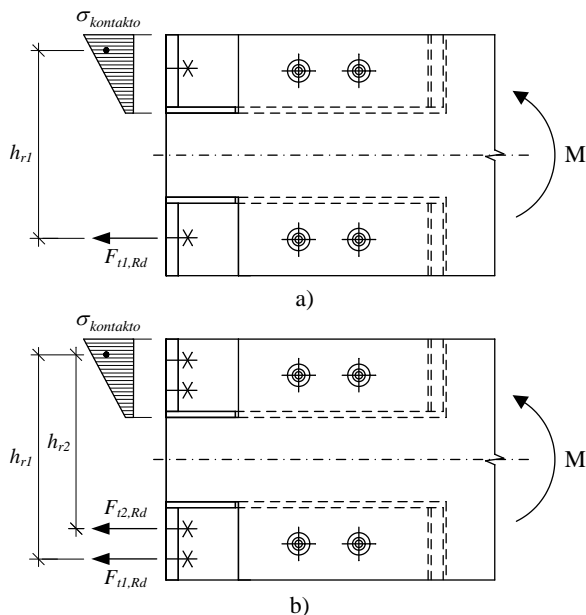
Nustatant atstumą  $h_r$  tarp gniuždomosios dalies svorio centro ir tempiamosios dalies varžtų centro, gniuždomojoje dalyje priimamas trikampis įtempių pasiskirstymas, kaip parodyta 4.3 paveiksle. Pateikiamas kontakto įtempių pasiskirstymas yra gautas atliekant skaitinę analizę baigtinių elementų metodu, apertu trečiajame disertacijos skyriuje.

Turint jungtį su viena tempiamų varžtų eile jungties tempiamajoje zonoje, efektyvioji skaičiuotinė varžtų eilės tempiamoji galia  $F_{tr,Rd}$  yra prilyginama mažiausiai vienos eilės pagrindinių komponentų skaičiuotinei tempiamosios galios  $F_{t,Rd}$  reikšmei:

$$F_{t,Rd} = \min \{ F_{epc,Rd}; F_{spc,Rd}; F_{epb,Rd}; F_{spt,Rd}; F_{ept,Rd}; F_{ts,Rd}; F_{tt,Rd} \}, \quad (4.2)$$

čia  $F_{epc,Rd}$  – lenkimo dėl gniuždymo veikiamos galinės T pavidalo inkaruojamos plokštelės, apimant ir medienos gniuždymą, laikomoji galia;  $F_{spc,Rd}$  – gniuždymo veikiamos išilginės plieninės plokštelės jungties gniuždomojoje dalyje laikomoji galia;  $F_{epb,Rd}$  – lenkimo veikiamos galinės plokštelės jungties tempiamajoje dalyje laikomoji galia;  $F_{spt,Rd}$  – tempimo veikiamos išilginės plokštelės laikomoji galia;  $F_{ts}$  – šlyties veikiamos medienos jungties tempiamajoje dalyje laikomoji galia;  $F_{ept}$  – lenkimo dėl tempimo veikiamos galinės T pavidalo inkaruojamos plokštelės, apimant ir medienos gniuždymą mazgo tempiamajoje dalyje, laikomoji galia;  $F_{tt,Rd}$  – tempimo veikiamos medienos mazgo tempiamajoje dalyje laikomoji galia.



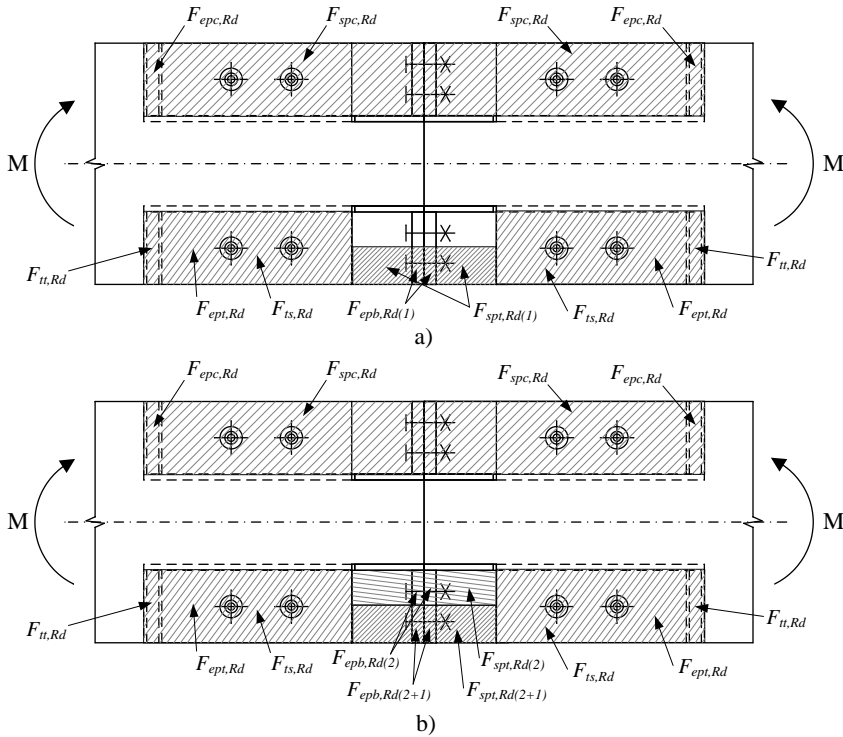


**4.3 pav.** Atstumas tarp gniuždomosios ir tempiamosios zonų mazge:  
a) viena tempiamoji varžtų eilė; b) dvi tempiamosios eilės

**Fig. 4.3.** The distance between tension and compression parts of the connection: a) one tension bolt row, b) two tension bolt rows

Kai mazgo tempiamajoje dalyje yra daugiau nei viena tempiamų varžtų eilė, efektyvioji skaičiuotinė kiekvienos eilės tempiamoji galia  $F_{tr,Rd}$  nustatoma paeiliui, pradedant nuo pirmosios varžtų eilės, tai yra labiausiai nutolusios nuo gniuždymo centro, tuomet pereinant prie antrosios, kaip pateikiama 4.4 paveiksle. Nustatant efektyviąją skaičiuotinę  $r$  varžtų eilės tempiamąją galią  $F_{tr,Rd}$ , visų arčiau gniuždymo centro esančių varžtų eilių efektyviosios skaičiuotinės tempiamosios galios turi būti nepaisoma. Efektyvioji skaičiuotinė  $r$  varžtų eilės tempiamoji galia  $F_{tr,Rd}$  turi būti prilyginama jos, kaip atskiros eilės, skaičiuotinei tempiamajai galiai  $F_{t,Rd}$ . Jungties tempiamajoje zonoje esant daugiau nei vienai varžtų eilei, analizuojama varžtų eilė turi būti nagrinėjama ir kaip varžtų eilių grupės dalis. Jei reikia, efektyvioji skaičiuotinė  $r$  varžtų eilės tempiamoji galia  $F_{tr,Rd}$  turi būti sumažinama iki mažesnės nei nurodyta  $F_{t,Rd}$ , kad būtų užtikrinta, kad tos pačios varžtų eilių grupės, varžtų eilių iki  $r$  eilės ir įskaitant ją, skaičiuotinių laikomųjų galių suma neviršija tos grupės skaičiuotinės laikomosios galios. 4.4 paveiksle pateikiamos mazgo komponentų laikomosios galios. 4.4 paveiksle naudojami indeksai: (1) – pirmosios, tai yra labiausiai nuo gniuždymo centro esančios, varžtų eilės laikomoji galia, nustatyta atskirai nagrinėjamai varžtų eilei; (2) – antrosios varžtų eilės laikomoji galia, nustatyta atskirai nagrinėjamai

varžtų eilei; (2+1) – pirmosios ir antrosios varžtų eilių laikomoji galia, nagrinėjant jas kaip varžtų eilių grupės dalis.



**4.4 pav.** Mazgo komponentų laikomosios galios: a) pirmosios varžtų eilės kaip atskiros eilės; b) antrosios varžtų eilės kaip atskiros ir kaip varžtų eilių grupės dalis

**Fig. 4.4.** The resistances of the connection's components: a) first bolt row as separate row, b) second bolt row as separate row and as a row group

Pirmosios, labiausiai nuo gniuždymo centro nutolusios, varžtų eilės tempiamoji galia randama remiantis Faella *et al.* (2000) 5.20 išraiška:

$$F_{t1,Rd} = \min \left\{ F_{epc,Rd}; F_{spc,Rd}; F_{epb,Rd(1)}; F_{spt,Rd(1)}; F_{ept,Rd}; F_{ts,Rd}; F_{tt,Rd} \right\}. \quad (4.3)$$

Antrosios varžtų eilės, kuri įvertinama kaip antrosios varžtų eilės, nagrinėjamos kaip atskiros eilės ir kaip varžtų eilių grupės dalies, laikomoji galia pagal Faella *et al.* (2000) 5.21 išraišką:

$$F_{t2,Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} F_{epc,Rd} - F_{t1,Rd}; F_{spc,Rd} - F_{t1,Rd}; F_{epb,Rd(2)}; \\ F_{epb,Rd(2+1)} - F_{t1,Rd}; F_{spt,Rd} - F_{t1,Rd}; F_{ept,Rd} - \\ F_{t1,Rd}; F_{ts,Rd} - F_{t1,Rd}; F_{tt,Rd} - F_{t1,Rd} \end{array} \right\}. \quad (4.4)$$

Kai jungtyje yra daugiau nei dvi tempiamųjų varžtų eilės,  $i$ -osios varžtų eilės, analizuojamos kaip atskiros eilės ir kaip varžtų eilių grupės dalies, laikomoji galia randama imant mažiausią iš pateiktų išraiškų:

$$F_{ti,Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} F_{epc,Rd} - \sum_{j=1}^{i-1} F_{tj,Rd}; F_{spc,Rd} - \sum_{j=1}^{i-1} F_{tj,Rd}; F_{spt,Rd} - \sum_{j=1}^{i-1} F_{tj,Rd}; \\ F_{ept,Rd} - \sum_{j=1}^{i-1} F_{tj,Rd}; F_{ts,Rd} - \sum_{j=1}^{i-1} F_{tj,Rd}; F_{tt,Rd} - \sum_{j=1}^{i-1} F_{tj,Rd} \end{array} \right\}, \quad (4.5)$$

$$F_{ti,Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} F_{epb,Rd(i)}; F_{epb,Rd(i+(i-1))} - F_{t(i-1),Rd}; \\ F_{epb,Rd(i+(i-1)+...+1)} - \sum_{j=1}^{i-1} F_{tj,Rd} \end{array} \right\}, \quad (4.6)$$

$$F_{ti,Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} F_{spt,Rd(i)}; F_{spt,Rd(i+(i-1))} - F_{t(i-1),Rd}; \\ F_{spt,Rd(i+(i-1)+...+1)} - \sum_{j=1}^{i-1} F_{tj,Rd} \end{array} \right\}. \quad (4.7)$$

### 4.3. Mazgo komponentų laikomosios galios

Mazgo lenkiamoji galia priklauso nuo jungtį sudarančių aukščiau aptartų aktyvių komponentų laikomųjų galių. Randamos atskirų mazgo komponentų, apimančių medienos stiprumą bei plieninės dalies stiprumą ir pastovumą, laikomosios galios. Nustatant atskirų komponentų laikomąsias galias, plieninių detalių virintinių siūlių stiprumas neanalizuojamas, kadangi taikomas suvirinimo būdas visiškai pravirinant sujungiamą elementą, tad sandūros stiprumą nulemia ne siūlės stiprumas.

#### Komponentas $F_{spc,Rd}$

Gniuždomos plieninės plokštelės laikomoji galia randama remiantis skersinio gniuždymo veikiamos nestandintos kolonos sienelės laikomąja galia, nustatoma pagal LST EN 1993-1-8 (2006) 6.9 išraišką, kuri pritaikoma gniuždomai plokštelei:

$$F_{spc,Rd} = \frac{\omega \cdot k_{wc} \cdot b_{eff,spc} \cdot t_{pl} \cdot f_{y,pl}}{\gamma_{M0}}, \quad (4.8)$$

$$F_{spc,Rd} \leq \frac{\omega \cdot k_{wc} \cdot \rho \cdot b_{eff,spc} \cdot t_{pl} \cdot f_{y,pl}}{\gamma_{M1}}, \quad (4.9)$$

čia  $\omega$  – pataisos koeficientas galimiems sąveikos su šlytimi kolonos sienelės plokštelėje poveikiams įvertinti, kuris pagal LST EN 1993–1–8 (2006), 6.3 lentelę priimamas kaip lygus 1,0;  $k_{wc}$  – pataisos koeficientas, kuris yra lygus:  $k_{wc} = 1,0$ , kai  $\sigma_{com,Ed} \leq 0,7 \cdot f_y$  ir  $k_{wc} = 1,7 - \sigma_{com,Ed} / f_y$ , kai  $\sigma_{com,Ed} > 0,7 \cdot f_y$  (kur  $\sigma_{com,Ed}$  – didžiausieji gniuždomieji įtempiai dėl ašinės jėgos ir lenkiamojo momento);  $b_{eff,spc}$  – gniuždymo veikiamos plokštelės efektyvusis plotis;  $t_{pl}$  – gniuždymo veikiamos plokštelės storis;  $\rho$  – plokštelės klupumo pataisos koeficientas, kuris nustatomas:

$$\rho = 1,0, \text{ kai } \bar{\lambda}_p \leq 0,72; \quad (4.11)$$

$$\rho = (\bar{\lambda}_p - 0,2) / \bar{\lambda}_p^2, \text{ kai } \bar{\lambda}_p > 0,72; \quad (4.12)$$

$$\text{kur } \bar{\lambda}_p = 0,932 \sqrt{\frac{b_{eff,spc} \cdot d_{spc} \cdot f_y}{E \cdot t_{pl}^2}}, \quad (4.13)$$

čia  $\bar{\lambda}_p$  – gniuždomos plokštelės sąlyginis liaunis.

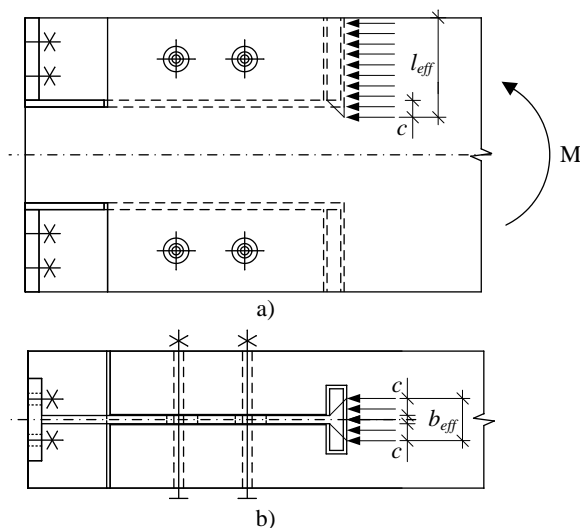
### Komponentai $F_{epc,Rd}$ ir $F_{ept,Rd}$

Lenkimo dėl gniuždymo veikiamos galinės T pavidalo plokštelės gniuždomoji galia jungties gniuždomojoje zonoje apima ir nustatytą medienos glemžiamosios laikomosios galios, tai yra užtikrinant, kad nebus viršyti medienos įtempiai efektyviajame gniuždymo veikiamame plote (4.5 paveikslas). Medienos, gniuždomos plienine detale, laikomoji galia nustatoma remiantis LST EN 1993–1–8 (2006) pateikiamu gniuždymo veikiamu lygiaverčiu tėjiniu galiniu elementu. LST EN 1993–1–8 (2006) pateikiamos išraiškos, lenkimo dėl glemžiamojo slėgio į pamatą veikiamos plieninės plokštelės bei glemžimo veikiamo betono, laikomosios galios.

Nustatant šio komponento laikomąją galią remiamasi gniuždymo veikiamo lygiaverčio tėjinio galinio elemento laikomąją galią pagal LST EN 1993–1–8 (2006), 6.4 išraišką, kurioje betono gniuždomasis stipris pakeičiamas medienos gniuždomuoju stipriu:

$$F_{epc,Rd} = f_{c,0,d} \cdot b_{eff} \cdot l_{eff}, \quad (4.14)$$

čia  $f_{c,0,d}$  – skaičiuotinis medienos gniuždomasis stipris, nustatomas pagal LST EN 1995–1–1 (2006), 2.14 išraišką;  $b_{eff}$  – tėjinio galinio elemento (glemžiamos medienos) efektyvusis plotis;  $l_{eff}$  – tėjinio galinio elemento (glemžiamos medienos) efektyvusis ilgis.



**4.5 pav.** Gniuždymo veikiamos medienos sąlyčio su detale srityje efektyviojo pločio nustatymas: a) mazgo vaizdas iš priekio; b) iš viršaus

**Fig. 4.5.** The effective compressive area of timber in the tight contact with steel detail: a) front view, b) the view from top

Susidarantys įtempiai efektyviajame medienos plote neturi būti didesni nei skaičiuotinis medienos gniuždomasis stipris  $f_{c,0,d}$ , o papildomas glemžiamasis plotis  $c$  (4.5 paveikslas) turi būti nustatomas pagal LST EN 1993–1–8 (2006), 6.4 išraišką:

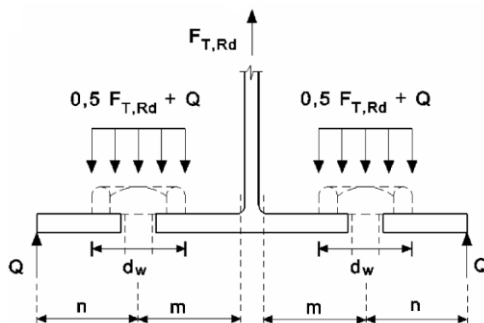
$$c = t \left[ f_y / 3 \cdot f_{c,0,d} \cdot \gamma_{M0} \right]^{0.5}, \quad (4.15)$$

čia  $t$  – tėjinio galinio elemento plokštės storis;  $f_y$  – tėjinio galinio elemento charakteristinis stipris pagal takumo ribą.

Medienos gniuždomoji galia jungties tempiamojoje zonoje  $F_{ept,Rd}$  nustatoma analogiškai kaip ir jungties gniuždomojoje zonoje, tačiau iš efektyviojo pločio  $b_{eff}$  atimamas išfrezavimo mediniame elemente storis, kuris įrengiamas išilginei plokštei.

**Komponentas  $F_{epb,Rd}$** 

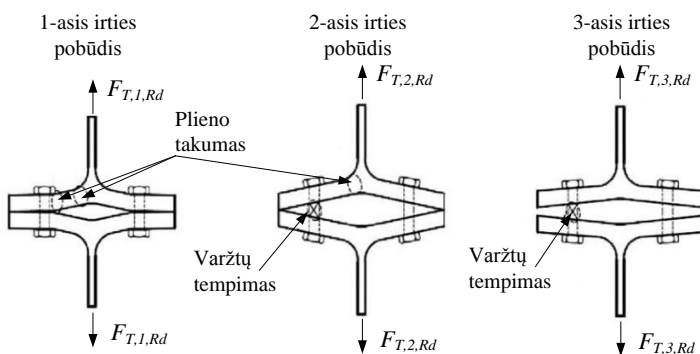
Lenkimo veikiamos galinės plokštelės jungties tempiamojoje zonoje laikomoji galia nustatoma kaip tęjinio galinio elemento juostos laikomoji galia, kaip pateikiama 4.6 paveiksle (LST EN 1993–1–8, 2006). Nustatant skaičiuotinę tęjinio galinio elemento juostos laikomąją galią, analizuojamas plokštelės stiprumas ir varžtų irties atvejis. Išanalizavus visus irties pobūdžius, komponento laikomoji galia prilyginama mažiausiajai.



**4.6 pav.** Lygiaverčio tęjinio galinio elemento, naudojamo galinės lenkiamos plokštelės laikomajai galiai nustatyti, schema (LST EN 1993–1–8)

**Fig. 4.6.** The T-stub flange used for determination of the bearing capacity of back plate subjected to bending (LST EN 1993-1-8)

Nustatant galinės lenkiamos plokštelės laikomąją galią remiantis tęjinio galinio elemento juostos laikomąją galią, analizuojami trys galimi irties pobūdžiai, kaip pateikiama 4.7 paveiksle (Faella *et al.* 2000).



**4.7 pav.** Lenkimo dėl tempimo veikiamos galinės T pavidalo plokštelės su varžtais trys galimi irties pobūdžiai (Faella *et al.* 2000)

**Fig. 4.7.** The three possible failure modes of the T-stub flange with bolts (Faella *et al.* 2000)

Pirmasis irties pobūdis – visiškas juostos plastiškumas. Šiuo atveju išskiriami du atvejai, tai yra be atraminių plokštelių ir su atraminėmis plokštelėmis (LST EN 1993–1–8, 2006):

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 \cdot M_{pl,1,Rd}}{m}, \quad (4.16)$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 \cdot M_{pl,1,Rd} + 2 \cdot M_{bp,Rd}}{m}, \quad (4.17)$$

antrasis irties pobūdis – varžtų irtis su juostos plastiškumu (LST EN 1993–1–8, 2006):

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl,2,Rd} + n \cdot \sum F_{t,Rd}}{m + n}, \quad (4.18)$$

trečiasis irties pobūdis – varžtų irtis (LST EN 1993–1–8, 2006):

$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd}, \quad (4.19)$$

čia  $M_{pl,1,Rd} = 0,25 \sum l_{eff,1} t_{bp}^2 \cdot f_y / \gamma_{M0}$ ;  $M_{pl,2,Rd} = 0,25 \sum l_{eff,2} t_{bp}^2 \cdot f_y / \gamma_{M0}$ , kai  $\sum l_{eff,1}$  – pirmojo irties pobūdžio juostos efektyvusis plotis, kuris yra lygus  $l_{eff}$  atskirai nagrinėjamai varžtų eilei ir  $\sum l_{eff}$ , kai varžtų eilė nagrinėjama kaip varžtų eilių grupės dalis;  $t_{bp}$  – galinės plokštelės storis;  $m$  ir  $n$  reikšmės pateikiamos 4.6 paveiksle.

### Komponentas $F_{spt,Rd}$

Skaičiuotinė tempiamos išilginės plokštelės jungties tempiamojoje zonoje laikomoji galia prilyginama jungties su galine plokštele skaičiuotinei sijos tempimajai galiai pagal LST EN 1993–1–8, 6.22 išraišką. Ši išraiška pritaikoma tempiamosios plieninės plokštelės laikomosios galios nustatymui:

$$F_{spt,Rd} = b_{eff,t,pl} \cdot t_{pl} \cdot f_{y,pl} / \gamma_{M0}, \quad (4.20)$$

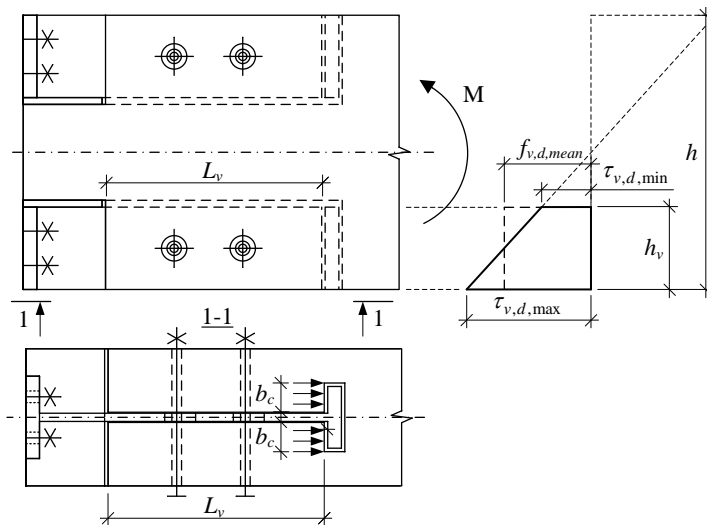
čia  $b_{eff,t,pl}$  – tempimo veikiamos sijos sienelės efektyvusis plotis, kuris prilyginamas lenkiamąją galinę plokštelę atstojančio lygiaverčio tėjinio galinio elemento efektyviajam ilgiui, nustatomam atskirai varžtų eilei ar varžtų grupei  $\sum b_{eff,t,pl}$ , tačiau negali būti daugiau nei tempiamos plokštelės bendras skerspjūvio aukštis, nustatant varžtų grupę;  $t_{pl}$  – tempiamos plokštelės storis;  $f_{y,pl}$  – charakteristinis plieno stipris pagal takumo ribą.

**Komponentas  $F_{ts,Rd}$** 

Mazgo tempiamojoje zonoje šlyties įtempiai  $\tau_{v,d}$  šlyties bloko atžvilgiu pasiskirsto netolygiai (Kazuhiro *et al.* 2010, Villar *et al.* 2007), kaip pateikiama 4.8 paveiksle. Šlyties veikiamos medienos laikomoji galia nustatoma pagal išraišką:

$$F_{ts,Rd} = h_v \cdot L_v \cdot f_{v,d,mean}, \quad (4.21)$$

čia  $h_v$  – šlyties veikiamos medienos aukštis jungties tempiamojoje zonoje (4.8 paveikslas);  $L_v$  – šlyties veikiamas medienos ilgis jungties tempiamojoje zonoje (4.8 paveikslas);  $f_{v,d,mean}$  – vidutinė medienos šlyjamojo stiprio reikšmė šlyties veikiamame medienos plote (4.8 paveikslas).



**4.8 pav.** Šlyties veikiamas medienos plotas jungties tempiamojoje zonoje

**Fig. 4.8.** The area subjected to shear in the tension zone of the connection

Medienos šlyties stiprio vidutinė reikšmė randama pagal išraišką:

$$f_{v,d,mean} = \frac{f_{v,d}(h - h_v)}{h}, \quad (4.22)$$

$$\text{čia } f_{v,d} = \min \begin{pmatrix} f_{v,k} k_{mod} / \gamma_M \\ 0,2 f_{m,k}^{0,8} k_{mod} / \gamma_M \\ 3,8 \text{MPa} \cdot k_{mod} / \gamma_M \end{pmatrix}, \quad (4.23)$$



čia  $f_{v,k}$  – charakteristinis medienos šlyjamasis stipris, MPa;  $f_{m,k}$  – charakteristinis medienos lenkiamasis stipris, MPa;  $k_{mod}$  – modifikacijos koeficientas;  $\gamma_M$  – medžiagos dalinis patikimumo koeficientas medienai;  $h$  – sijos aukštis.

4.21 išraiška naudojama įkirtinių jungčių šlyjamąsios laikomosios galios skaičiavimuose. Medienos šlyjamąjo stiprio reikšmė  $f_{v,d}$  naudojama, kai užtikrinama skeliamojo ploto sąlyga  $200 \text{ mm} < L_v \leq 8 \cdot b_c$  (žymėjimai pateikiami 4.8 paveiksle).

### Komponentas $F_{t,Rd}$

Skaičiuotinė tempimo veikiamos medienos jungties tempiamąjoje zonoje laikomoji galia randama pagal išraišką:

$$F_{t,Rd} = b_t \cdot h_t \cdot f_{t,0,d}, \quad (4.24)$$

čia  $b_t$  – tempimo veikiamos medienos mazgo tempiamąjoje zonoje suminis plotis;  $h_t$  – tempimo veikiamos medienos mazgo tempiamąjoje zonoje aukštis;  $f_{t,0,d}$  – skaičiuotinis medienos tempiamasis stipris.

## 4.4. Mazgo sukamojo standžio skaičiavimas

Mazgo sukamasis standis nustatomas pagal pagrindinių komponentų lankstumą, kurį apibūdina tampriojo standžio koeficientas  $k_i$ . Analizuojamos jungties aktyvūs komponentai pateikiami 4.2 paveiksle.

Mazgo sukamasis standis apskaičiuojamas pagal 6.27 išraišką, pateikiamą LST EN 1993–1–8 (2005):

$$S_j = \frac{E \cdot z^2}{\mu \cdot \sum \frac{1}{k_i}}. \quad (4.25)$$

Jungtims, kuriose yra kelios skirtingos medžiagos, kaip analizuojamu atveju mediena ir metalas, 4.22 išraiška gali būti užrašoma tokia forma, kurioje būtų įvertintas kiekvieno komponento standis bei tamprumo modulis:

$$S_j = \frac{z^2}{\mu \cdot \sum \frac{1}{E_i \cdot k_i}}, \quad (4.26)$$

čia  $k_i$  – pagrindinio mazgo komponento  $i$  standžio koeficientas;  $z$  – ekvivalentinis petys;  $\mu$  – standžio santykis tarp pradinio jungties standžio ir galutinio;  $E_i$  –  $i$ -ojo komponento tamprumo modulis.

Mazgo pradinis sukamasis standis  $S_{j,ini}$  nustatomas taikant 4.26 išraišką ir priėmus  $\mu = 1,0$ . Standžio santykis  $\mu$  plieninių konstrukcijų jungtims nustatomas pagal išraišką (LST EN 1993–1–8):

$$\begin{cases} kai \ M_{j,Ed} \leq 2/3 \cdot M_{j,Rd}, tai \ \mu = 1,0; \\ kai \ 2/3 \cdot M_{j,Rd} < M_{j,Ed} \leq M_{j,Rd}, tai \ \mu = \left(1,5 \cdot M_{j,Ed} / M_{j,Rd}\right)^{\psi}, \end{cases} \quad (4.27)$$

čia  $\psi$  yra jungties tipą įvertinantis koeficientas, kurio reikšmė, priklausomai nuo jungties tipo, yra 2,7–3,1;  $M_{j,Ed}$  – lenkiamasis momentas jungtyje;  $M_{j,Rd}$  – mazgo lenkiamoji galia.

Iš 4.27 išraiškos matyti, kad plieninių konstrukcijų jungtyse tampri tiesinė mazgo elgsena yra iki jungtyje pasiekiamo lenkiamojo momento reikšmė  $2/3 M_{j,Rd}$ . Medinių konstrukcijų jungtyse, remiantis ankstesniais tyrimais, priklausomai nuo jungties tipo, tampriai tiesinė mazgo elgsena yra iki kol jungtyje pasiekiamo lenkiamojo momento reikšmė lygi 40–80 % laikomosios galios. Šiame darbe tiriamos jungties tampri tiesinė elgsena yra iki kol apkrovos reikšmė pasiekia 40 % nuo maksimalios reikšmės. Ši prielaida yra pagrįsta eksperimentiniais tyrimais ir skaitinio modeliavimo baigtiniais elementais rezultatais.

Mazgų su galinėmis plokštelėmis, kuriose tempimo yra veikiamos dvi ir daugiau varžtų eilių, pagrindiniai su visomis šiomis varžtų eilėmis susiję komponentai turi būti vertinami taikant lygiavertį standžio koeficientą  $k_{eq}$ , nustatomą pagal LST EN 1993–1–8 (2005), 6.29 išraišką:

$$k_{eq} = \frac{\sum k_{eff,r} \cdot h_r}{z_{eq}}, \quad (4.28)$$

čia  $h_r$  – atstumas tarp  $r$ -osios varžtų eilės ir gniuždymo centro;  $k_{eff,r}$  –  $r$  varžtų eilės efektyvusis standžio koeficientas, atsižvelgiant į lenkimo veikiamų galinių plokštelių ir tempimo veikiamų varžtų komponentų standžio koeficientus;  $z_{eq}$  – lygiavertis petys.

Varžtų  $r$ -osios eilės efektyvusis standžio koeficientas  $k_{eff,r}$  nustatomas pagal LST EN 1993–1–8 (2005), 6.30 išraišką:

$$k_{eff,r} = \frac{1}{\sum_i \frac{1}{k_{i,r}}}, \quad (4.29)$$

čia  $k_{i,r}$  – standžio koeficientas, atitinkantis  $i$  komponentą  $r$  varžtų eilės atžvilgiu.

Lygiavertis petys  $z_{eq}$  nustatomas pagal LST EN 1993–1–8 (2005), 6.31 išraišką:

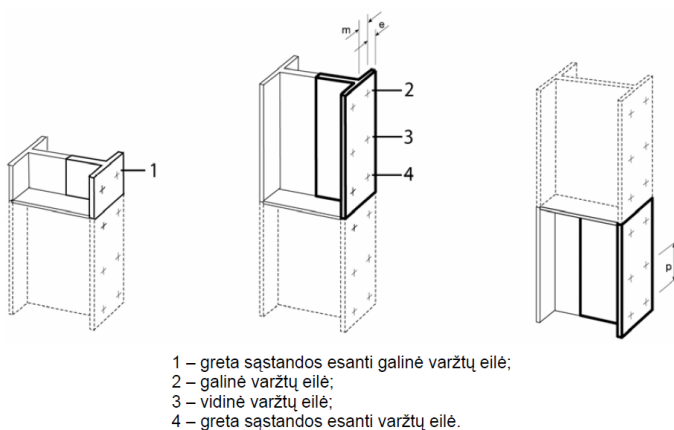
$$z_{eq} = \frac{\sum_r k_{eff,r} \cdot h_r^2}{\sum_r k_{eff,r} \cdot h_r} \cdot \quad (4.30)$$

## 4.5. Mazgo komponentų standžio koeficientų išraiškos

Toliau poskyryje pateikiamos analizuojamos mazgo aktyvių komponentų standžio koeficientų išraiškos. Plieninių detalių ir varžtų standžio koeficientai priimami remiantis LST EN 1993–1–8 (2005) ir Faella *et al.* (2000) šaltiniais. Medienos komponentų standžio koeficientų išraiškos nustatomos remiantis eksperimentinių tyrimų duomenimis bei jungties modeliavimo baigtiniais elementais rezultatais, aprašytais atitinkamai 2 ir 3 disertacijos skyriuose.

### Standžio koeficientas $k_{epb}$

Lenkimo veikiami galinė plokštelė analizuojama atskirais tęjiniais galiniais elementais kaip lenkimo dėl tempimo veikiami kolonos juosta, kaip pateikiama 4.9 paveiksle.



**4.9 pav.** Standintos kolonos juostos modeliavimas atskirais tęjiniais galiniais elementais (LST EN 1993–1–8, 2005)

**Fig. 4.9.** Modelling a stiffened column flange as separate T-stubs (LST EN 1993–1–8; 2005)

Lenkimo veikiamos galinės plokštelės standžio koeficientas, kai tempimo veikiamą vieną varžtų eilę, randamas pagal LST EN 1993–1–8 (2005), 6.11 lentelėje pateikiamą išraišką:

$$k_{epb} = \frac{0,9 \cdot l_{eff} \cdot t_p^3}{m^3}, \quad (4.31)$$

čia  $l_{eff}$  – mažiausias iš efektyviųjų ilgių, kuris nustatomas galinę plokštelę traktuojant kaip lenkimo veikiamą kolonos juostą;  $t_p$  – galinės plokštelės storis;  $m$  – atstumas nuo varžto centro iki tempiamosios išilginės plokštelės, kaip pateikiama 4.9 paveiksle.

#### Standžio koeficientas $k_{bt}$

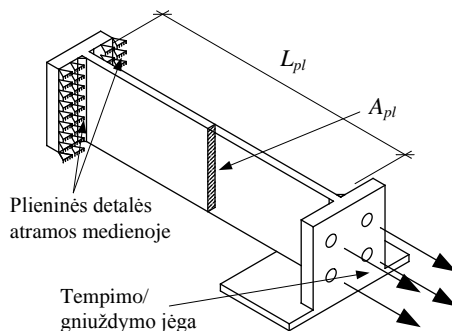
Tempimo veikiamų varžtų standžio koeficientas nustatomas pagal LST EN 1993–1–8 (2005), 6.11 lentelėje pateikiamą išraišką:

$$k_{bt} = \frac{1,6 \cdot A_s}{L_b}, \quad (4.32)$$

čia  $A_s$  – grynasis varžtų skerspjūvio plotas analizuojamoje eilėje;  $L_b$  – varžto pailgėjimo ilgis, prilyginamas aprėpiamajam ilgiui (bendram elementų ir poveržlių storiui), pridedant pusę varžto galvutės aukščio ir veržlės aukščio sumos.

#### Standžio koeficientas $k_{spt}$ ir $k_{spc}$

Nustatant tempiamų ar gniuždomų elementų standžio koeficientus remiantis klasikinės mechanikos išraiškomis, pagrindinis uždavinys yra nustatyti efektyvųjį ilgį, kuriame elementas deformuojasi išilgine linkme. Ilgis, kuriame plieninės detalės išilginė plokštelė deformuojasi, nustatomas remiantis jungties analize baigtinių elementų metodu (3 disertacijos skyrius). Plokštelės efektyvusis ilgis lygus  $0,9L_{pl}$  (4.10 paveikslas);  $L_{pl}$  yra geometrinis išilginės plokštelės ilgis, atėmus suvirinimo siūlių aukščius iš abiejų pusių.



**4.10 pav.** Išilginės tempiamos ar gniuždomos plokštelės efektyvusis ilgis  
**Fig. 4.10.** The effective length of tension or compressive steel plate

Tempimo ar gniuždymo veikiamos išilginės plokštelės jungties tempiamojoje ( $k_{spt}$ ) ar gniuždomojoje ( $k_{spc}$ ) zonos standžio koeficientas nustatomas pagal išraišką:

$$k_{spt(spc)} = A_{pl} / 0,9 \cdot L_{pl}, \quad (4.33)$$

čia  $A_{pl}$  – tempiamos ar gniuždomos plokštelės skerspjūvio plotas;  $L_{pl}$  – tempiamos ar gniuždomos plokštelės geometrinis ilgis atimant suvirinimo siūlių aukščius iš abiejų galų.

#### Standžio koeficientas $k_{ept}$ ir $k_{epc}$

Lenkimo dėl tempimo veikiamą galinę T pavidalo inkaruojama plokštelę jungties tempiamojoje zonoje ( $k_{ept}$ ) ir lenkimo dėl gniuždymo veikiamą plokštelę jungties gniuždomojoje zonoje ( $k_{epc}$ ) skaičiuojama remiantis gniuždymo veikiamu betonu pagal LST EN 1993–1–8 (2005), 6.11 lentelėje pateikiamą išraišką, kuri jungčiai su mediena užrašoma:

$$k_{epc(ept)} = \frac{E_T \cdot \sqrt{b_{eff} \cdot l_{eff}}}{1,275 \cdot E_s}, \quad (4.34)$$

čia  $E_T$  – medienos tamprumo modulis išilgai medienos pluošto;  $E_s$  – plieno tamprumo modulis;  $b_{eff}$  – tęjinio galinio elemento juostos efektyvusis plotis (4.5 paveikslas);  $l_{eff}$  – tęjinio galinio elemento juostos efektyvusis ilgis (4.5 paveikslas).

Glemžiamos medienos įvairiais kampais standžio koeficientų nustatymo išraiškos gali būti nustatomos remiantis tamprios puserdvės teorija. Mokslininko Wald *et al.* (2000) pasiūlyta medienos, glemžiamos skirtingais kampais, standžio koeficiento išraiška pateikiama 1-ajame skyriuje, tačiau disertacijoje analizuojamam mazgui ši išraiška yra netinkama, kadangi turime medienos jungtį su plieniu, o ne medienos su mediena.

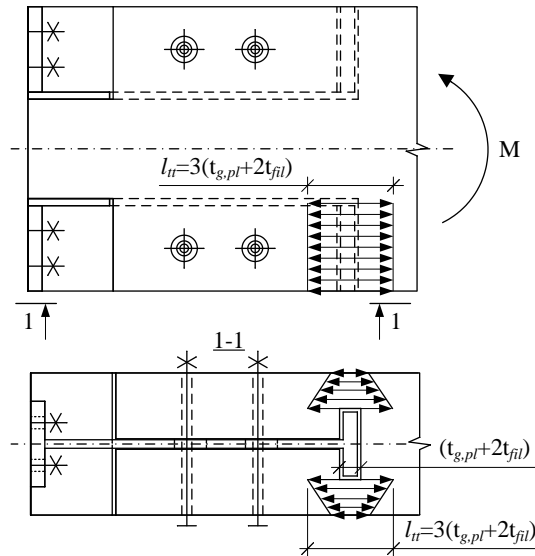
#### Standžio koeficientas $k_{tt}$

Medienos tempiamojoje zonoje efektyviojo ilgio nustatymo schema pateikiama 4.11 paveiksle. Tempimo veikiamos medienos standžio koeficientas nustatomas pagal išraišką:

$$k_{tt} = A_{tt} / 3(t_{g,pl} + 2t_{fil}), \quad (4.35)$$

čia  $A_{tt}$  – tempimo veikiamos medienos jungties tempiamojoje zonoje plotas;  $t_{g,pl}$  – galinės T pavidalo plokštelės storis;  $t_{fil}$  – užpildo storis.

Medienos, tempiamos išilgai medienos pluošto, standžio koeficientas nustatomas remiantis klasikinės mechanikos išraiška, kaip ir tempimo ar gniuždymo veikiamos plieninės plokštelės atveju. Tempimo veikiamą medieną yra jungties tempiamojoje zonoje, glaudaus medinio elemento ir metalinės detalės sąlyčio srityje (medienos likutinis skerspjūvis).



**4.11 pav.** Tempiamos medienos efektyviojo ilgio nustatymas mazgo tempiamojoje zonoje

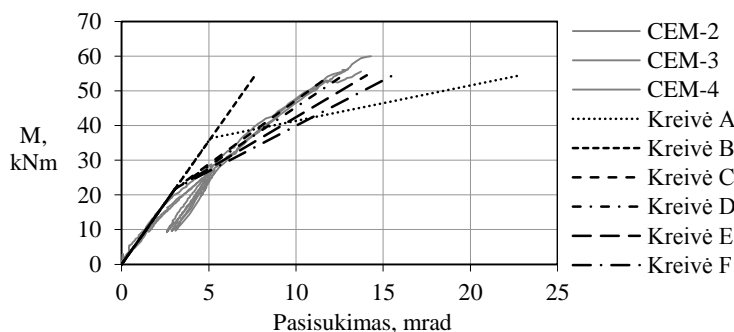
**Fig. 4.11.** The determination of effective length of timber tension in the tension zone of the connection

Medienos elemento efektyvusis ilgis, kuriame vyksta medienos pailgėjimas, nustatomas remiantis mazgo eksperimentiniais tyrimais ir modeliuojant mazgą baigtiniais elementais (2 ir 3 disertacijos skyriai).

## 4.6. Analizuojamo mazgo skaičiavimų komponentų metodu rezultatai ir jų palyginimas su eksperimentiniais tyrimais bei skaitine analize

Šiame poskyryje pateikiami teoriniai jungčių lenkiamosios galios ir sukamojo standžio skaičiavimai pagal 4.1–4.5 poskyriuose pateiktą komponentų metodu paremtą metodiką. Teoriniai skaičiavimai komponentų metodu atliekami 2 skyriuje pateikiamam mazgui, naudojant vidutines eksperimentiškai nustatytas medžiagų savybių reikšmes. 2 skyriuje pateikiamo mazgo teorinė lenkiamoji galia nustatyta komponentų metodu, yra  $M_{j,R,komp} = 54,5 \text{ kNm}$ . Teorinis mazgo irties pobūdis, kaip ir eksperimentinių tyrimų metu, yra dėl medienos šlyties apatinėje tempiamojoje zonoje. Atlikus teorinius mazgo sukamojo standžio skaičiavimus komponentų metodu, nustatytas pradinis sukamasis standis  $S_{j,ini,komp} = 7120 \text{ kNm/rad}$ .

Nustačius pradinį mazgo sukamąjį standį  $S_{j,ini}$  ir lenkiamąją galią  $M_{j,R,komp}$  komponentų metodu, turi būti nustatomas galutinis mazgo sukamasis standis, kuriuo remiantis gaunamas lenkiamojo momento ir pasisukimo sąryšis iki jungties irimo, tai yra ne tik tamprioje stadijoje, tačiau ir tampriai plastinėje. Analizuojant plieninių konstrukcijų sijos su sija, sijos su kolona ar kolonos su pamatu jungtis kaip pusiau standžias, tamprusis pradinis sukamasis standis yra laikomas iki kol jungtyje pasiekiamas lenkiamasis momentas  $2/3M_{j,Rd}$ . Viršijus šią lenkiamojo momento reikšmę, priimama, kad jungties sukamasis standis yra nustatomas pagal  $S_j = S_{j,ini} / \mu$ ; kur  $\mu$  yra standžio santykis, nustatomas pagal 4.27 išraišką. Standžio santykiui taip pat poveikio turi ir jungties tipo koeficientas  $\psi$ , kurio reikšmė yra lygi 2,7 plieninių konstrukcijų varžtinėms jungtims su galine plokšte. 4.12 paveiksle pateikiami skirtingi mazgo lenkiamojo momento ir pasisukimo sąryšiai.



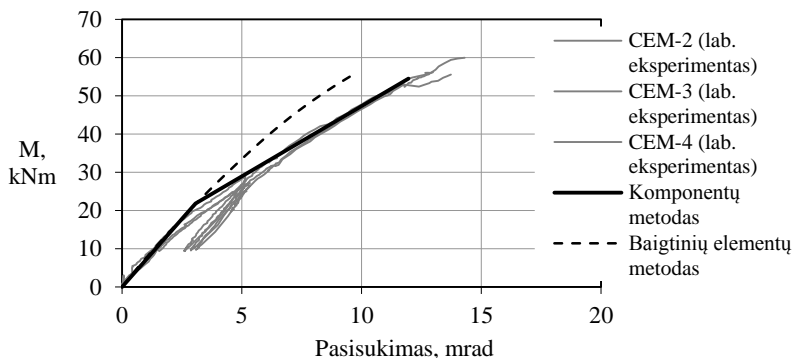
**4.12 pav.** Analizuojamo mazgo lenkiamojo momento ir pasisukimo kreivės: eksperimentinių tyrimų (CEM-2, CEM-3, CEM-4) ir naudojant skirtingus jungties tipo koeficientus (kreivės A, B, C, D, E, F)

**Fig. 4.12.** The moment-rotation curves of the analysed connection: experimental (CEM-2, CEM-3, CEM-4) and using different joint type coefficient (curves A; B; C; D; E; F)

Komponentų metodu nustatytus lenkiamojo momento ir pasisukimo sąryšius (4.12 paveikslas) lyginant su antrajame skyriuje pateikiamomis eksperimentiškai gautomis reikšmėmis, galima teigti, kad plieninių konstrukcijų mazgams (kreivė B pagal 4.12 paveikslą) pateikiamas jungties tipo koeficientas  $\psi = 2,7$  netinka analizuojamo tipo mazgui iš medienos ir metalo. Palyginimui 4.12 paveiksle pateikiamos 3 eksperimentinių bandymų kreivės (bandiniai su cemento užpildu CEM-2, CEM-3, CEM-4) ir šešios teorinių skaičiavimų kreivės, kurios vaizduoja skirtingus jungties tipo koeficientus  $\psi$  ir skirtingo dydžio pradinę tampriąją mazgo elgsenos dalį. Kreivė A yra vaizduojama pagal plieninių konstrukcijų jungtims pateikiamą metodiką, priimant jungties tipo koeficientą, lygų

$\psi = 2,7$ , bei tampriąją elgsenos dalį, lygią  $2/3M_{j,Rd}$ . Kreivė B vaizduoja tiesinį lenkiamojo momento ir pasisukimo sąryšį iki kol pasiekama maksimali mazgo lenkiamoji galia. Kreivės C, D, E, F yra nustatomos priimant mazgo tampriąją dalį lygią  $2/5M_{j,Rd}$  ir atitinkamai jungties tipo koeficientus  $\psi$  lygius 1,1; 1,25; 1,50; 1,75. Analizuojant skirtingus lenkiamojo momento ir pasisukimo sąryšius, galima pastebėti, kad analizuojamo mazgo tampri elgsena yra iki kol jungtyje pasiekama  $2/5M_{j,Rd}$  lenkiamojo momento bei kol jungties tipo koeficientas lygus  $\psi = 1,1$  (kreivė C pagal 4.12 paveikslą).

Nustačius jungties tipo koeficientą  $\psi = 1,1$  bei priėmus tampriąją elgsenos dalį, lygią  $2/5M_{j,Rd}$ , paveiksle 4.13 palyginama teoriškai komponentų metodu nustatyta lenkiamojo momento ir pasisukimo kreivė su eksperimentiniais tyrimais bei skaitiniu modeliavimu baigtinių elementų metodu. Rezultatams palyginti pasirenkamas MS baigtinių elementų mazgo modelis (3 disertacijos skyrius), kuris realiausiai atspindi mazgo su cementiniu užpildu elgseną. Paveikslas 4.13 rodo, kad tiriamo mazgo iš medienos ir metalo teoriniai skaičiavimai pateikiamu komponentų metodu atitinka eksperimentinių tyrimų metu bei skaitiniu modeliavimo baigtinių elementų metodu gautas lenkiamojo momento ir pasisukimo kreives.



**4.13 pav.** Analizuojamo mazgo lenkiamojo momento ir pasisukimo kreivės: eksperimentinių tyrimų (CEM-2, CEM-3, CEM-4) bei komponentų ir baigtinių elementų metodo

**Fig. 4.13.** The moment-rotation curves of the analysed connection: experimental (CEM-2, CEM-3, CEM-4), component method and finite element modelling

4.1 lentelėje pateikiami teorinių mazgo skaičiavimų komponentų metodu bei eksperimentinių tyrimų ir modeliavimo baigtinių elementų metodu rezultatai. Palyginimui su teoriniais skaičiavimais komponentų metodu imamas bandinių su cementiniu užpildu (CEM-2, CEM-3, CEM-4) vidurkis bei baigtinių elementų



modelio MS reikšmės. Iš 4.1 lentelės matyti, kad teoriškai komponentų metodu nustatyta lenkiamoji galia  $M_{j,R,komp}$  yra 4,8 % mažesnė nei nustatyta eksperimentinio tyrimo metu; taip pat 2,2 % mažesnė nei skaitiniu būdu modeliuojant baigtinių elementų metodu.

**4.1 lentelė.** Teorinių, eksperimentinių ir skaitinio modeliavimo rezultatų palyginimas  
**Table 4.1.** The comparison of the component method, laboratory and finite element modelling results

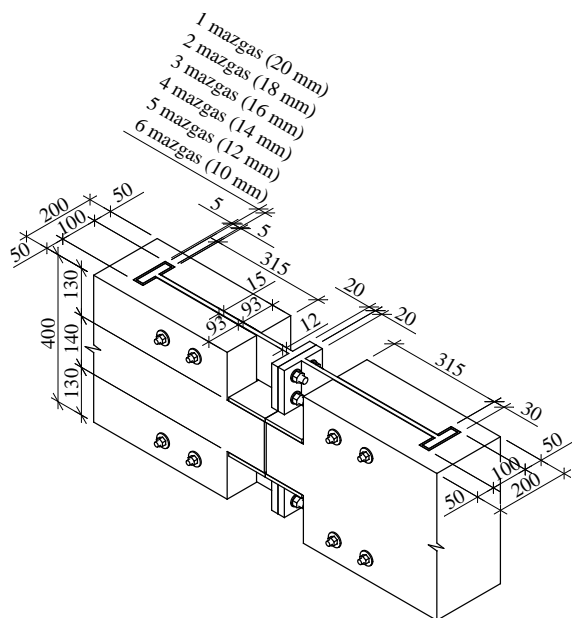
Metodas	Lenkiamoji laikomoji galia, kNm	Pradinis sukamasis standis, kNm/rad
Laboratorinis eksperimentas	$M_{j,R,exp} = 57,23$	$S_{j,ini,exp} = 5615$
Komponentų metodas	$M_{j,R,komp} = 54,50$	$S_{j,ini,komp} = 7120$
Modeliavimas baigtiniais elementais	$M_{j,R,FEM} = 55,75$	$S_{j,ini,FEM} = 7027$

Teoriniu komponentų metodu nustatytas pradinis sukamasis standis  $S_{j,ini,komp}$  yra 20,3 % didesnis nei pasiektas eksperimento metu. Pradiniu sukamuoju standžiu mazgo elgsena aprašoma tamprioje stadijoje, tai yra iki 40 % nuo maksimalios mazgo lenkiamosios galios. Lenkiamojo momento reikšmei viršijus šį dydį, teorinė komponentų metodo lenkiamojo momento ir pasisukimo kampo kreivė tiksliai reprezentuoja gautą eksperimento metu.

## 4.7. Komponentų metodo pritaikymas skirtingų matmenų mazgų skaičiavimuose

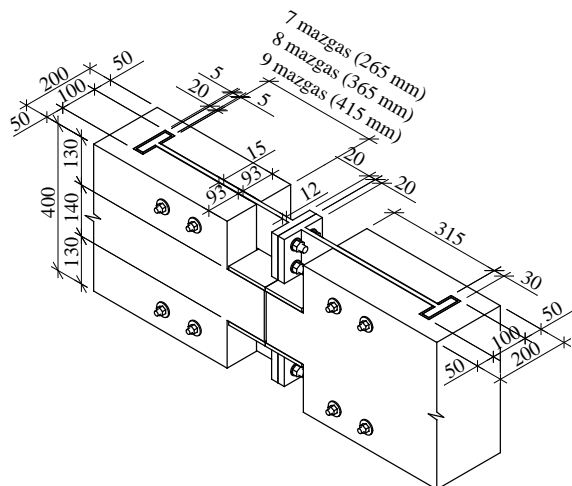
Pagal šiame skyriuje pateikiamą pusiau standaus mazgo iš medienos ir metalo lenkiamosios galios ir sukamojo standžio skaičiavimo metodiką atliekami skirtingų matmenų jungčių skaičiavimai, kurių tikslas yra nustatyti lenkiamąją galią bei sukamąjį standį keičiantis mazgo matmenims. Norint nustatyti tiriamo mazgo geometrinį parametų poveikį, iš viso pateikiama 12 skirtingų matmenų mazgų, kuriuose keičiami keli mazgo matmenys, kaip pateikiama 4.14–4.16 paveiksluose.

Keičiamas inkaruojamos galinės plokštelės storis, kaip pateikiama 4.14 paveiksle. Eksperimentiniuose tyrimuose analizuotas mazgas yra su 20 mm storio galine plokšte (pažymima 1 mazgas). Atliekami skaičiavimai taip pat esant galinės plokštelės storiui: 18 mm (2 mazgas); 16 mm (3 mazgas); 14 mm (4 mazgas); 12 mm (5 mazgas); 10 mm (6 mazgas).



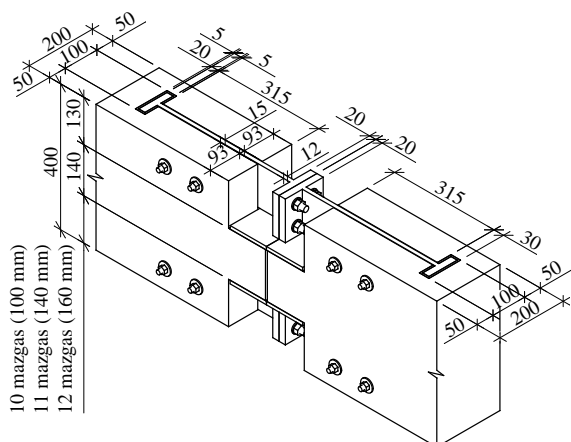
**4.14 pav.** Teoriniams skaičiavimams naudojami mazgai esant skirtingiems galinės plokštelės storiams

**Fig. 4.14.** The geometry of connections used for theoretical calculations with different back plate thicknesses



**4.15 pav.** Teoriniams skaičiavimams naudojami mazgai esant skirtingiems plokštelės inkaravimo ilgiams medienoje

**Fig. 4.15.** The geometry of connections used for theoretical calculations with different steel plate anchoring lengths into timber



**4.16 pav.** Teoriniams skaičiavimams naudojami mazgai esant skirtingiems galinės plokštelės aukščiams

**Fig. 4.16.** The geometry of connections used for theoretical calculations with different back plate heights

Taip pat keičiamas plieninės detalės inkaravimo medienoje ilgis (4.15 paveikslas). Eksperimentiniuose tyrimuose analizuoto mazgo inkaravimo ilgis yra 315 mm. Atliekami skaičiavimai, inkaravimo ilgį priimant kintantį kas 50 mm: 265 mm (7 mazgas); 365 mm (8 mazgas); 415 mm (9 mazgas).

Eksperimentiškai tirtu mazgo inkaruojamos detalės aukštis yra 120 mm. Skaičiavimai atliekami keičiant plieninės detalės aukštį kas 20 mm, iki 160 mm, tai yra: 100 mm (10 mazgas); 140 mm (11 mazgas); 160 mm (12 mazgas), kaip pateikiama 4.16 paveiksle.

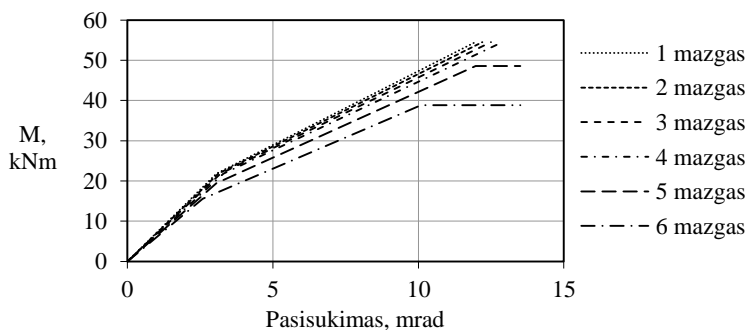
4.17–4.18 paveiksluose pateikiamos lenkiamojo momento ir pasisukimo kreivės visiems teoriškai tiriamiems mazgams (1–12) komponentų metodu. Lenkiamoji galia ir sukamieji standžiai pateikiami 4.2 lentelėje.

Kaip buvo aptarta pirmajame disertacijos skyriuje, pasirenkant analizuojamo inovatyvaus pusiau standaus mazgo iš medienos ir metalo konstrukciją, buvo siekiama, kad būtų galimybė gauti reikiamą mazgo sukamąjį standį bei lenkiamąją galią keičiant inkaruojamos plieninės detalės geometrinius parametrus. 4.17 paveikslas vaizduoja, kaip kinta mazgo sukamasis standis ir lenkiamoji galia keičiant galinės inkaruojamos plokštelės storį. Keičiant galinės plokštelės storį, keičiasi jungties elgsena bei irties pobūdis. Galinės inkaruojamos detalės storiui kintant nuo 20 mm iki 14 mm, lenkiamoji galia nepakinta, kadangi lenkiamąją galią nulemiantis parametras yra medienos šlytis jungties tempiamojoje zonoje, kuri neturi tiesioginio sąryšio su galinės plokštelės storiu. Šiam storiui kintant nuo 20 mm iki 14 mm, pradinis sukamasis standis sumažėja 7,8 %, tai nėra ryškus pokytis. Esant 12 mm galinės plokštelės storiui, jungties lenkiamoji

galia ir pradinis sukamasis standis sumažėja 12,2 %. Pasiekus šį storį, mazgo elgsena pasikeičia, kadangi stiprumą nulemia kitas parametras, tai yra medienos suglemžimas mazgo tempiamojoje zonoje glaudaus medienos ir metalo sąlyčio srityje. Iš 4.17 paveikslo matyti, kad teoriniam irties pobūdžiui esant dėl medienos glemžimo, irtis įvyksta plastiškai, nėra staigaus laikomosios galios kritimo.

**4.2 lentelė.** Mazgų lenkiamoji galia ir sukamieji standžiai nustatyti komponentų metodu  
**Table 4.2.** Moment resistance and stiffnesses determined by component method

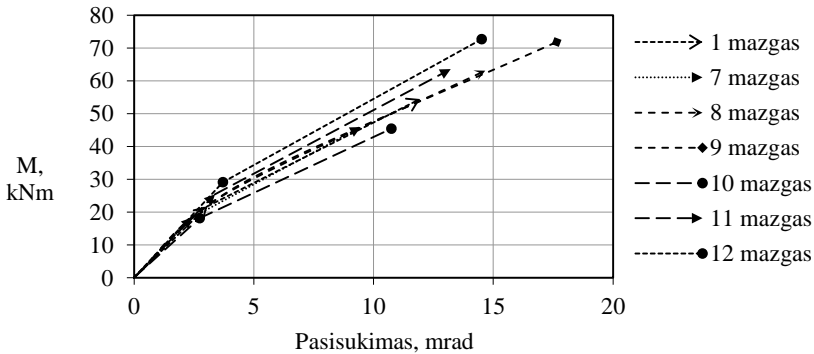
Mazgo numeris	$M_{j,R,komp}$ , kNm	$S_{j,ini,komp}$ , kNm/rad	$S_{j,komp}$ , kNm/rad
1	54,50	7121	4559
2	54,50	6982	4470
3	54,50	6813	4362
4	54,50	6606	4229
5	48,62	6348	4064
6	38,88	6016	3852
7	45,90	7575	4849
8	63,10	6718	4301
9	71,81	6359	4071
10	45,40	6601	4226
11	63,62	7512	4809
12	717,71	7819	5006



**4.17 pav.** Mazgo lenkiamomo momento ir pasisukimo sąryšiai esant skirtingiems galinės plokštelės storiams

**Fig. 4.17.** The moment-rotation curves with different end-plate thicknesses

Analizuojamo mazgo sukamojo standžio ir lenkiamosios laikomosios galios kitimas keičiantis plieninės detalės inkaravimo ilgiui ir aukščiui vaizduojami 4.18 paveiksle.



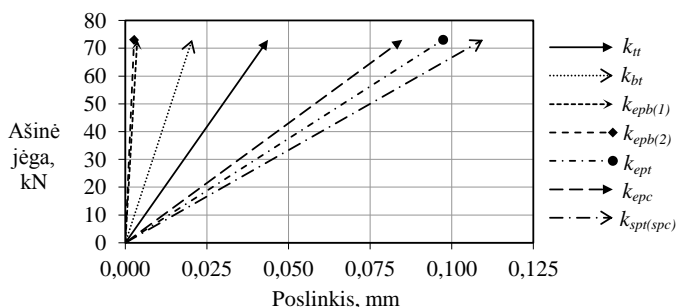
**4.18 pav.** Mazgo lenkiamojo momento ir pasisukimo sąryšiai esant skirtingiems plieninės detalės inkaravimo ilgiams ir aukščiams

**Fig. 4.18.** The moment-rotation curves with different length and height of anchoring plate

Iš 4.18 paveikslo matyti, kad didinant inkaruojamos plokštelės ilgį medienoje (7, 8 ir 9 mazgai), mazgo pradinis sukamasis standis sumažėja 19,1 %. Ryškus sukamojo standžio sumažėjimas įvyksta, kadangi plieninės išilginės plokštelės ilgis turi tiesioginį poveikį mazgo sukamajam standžiui. Šiuo atveju mazgo lenkiamoji galia  $M_{j,R}$  padidėja 56,4 %, kadangi didinamas medienos šlyjamasis plotas. Keičiant plieninės inkaruojamos detalės aukštį (10, 11 ir 12 mazgai), mazgo pradinis sukamasis standis didėja. Aukščiui pakitus 40 mm, pradinis sukamasis standis padidėja 18,5 %. Lenkiamoji galia taip pat padidėja 57,8 % didinant inkaruojamos detalės aukštį. Šis lenkiamosios galios ir sukamojo standžio padidėjimas keičiantis inkaruojamos detalės aukščiui sąlygojamas to, kad keičiami parametrai (medienos glemžiamojo ploto ir išilginės plokštelės skerspjuvio padidėjimas) turi teigiamą poveikį tiek laikomajai galiai, tiek sukamajam standžiui.

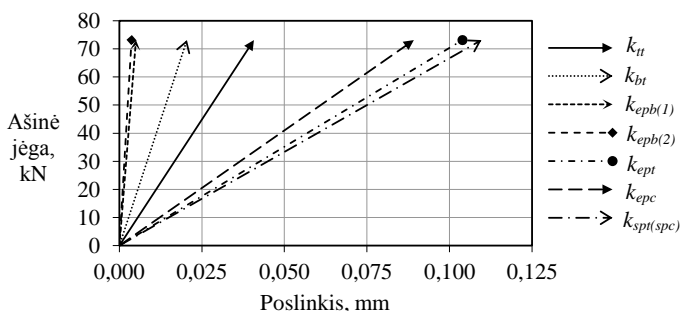
4.19–4.24 paveiksluose vaizduojamas grafinis apkrovos ir poslinkio sąryšis visiems mazgo komponentams esant 40 % maksimalios lenkiamosios galios apkrovai, tai yra tamprioje stadijoje.

4.19–4.24 paveiksluose vaizduojami apkrovos, veikiančios komponentą, ir išilginio pailgėjimo (sutrumpėjimo) grafikai. Minėtuose paveiksluose pateikiami žymėjimai:  $k_{tt}$  – medienos tempimas mazgo tempiamojoje zonoje;  $k_{bt}$  – varžtų tempimas;  $k_{epb(1)}$  – plokštelės lenkimas pirmosios varžtų eilės lygyje;  $k_{epb(2)}$  – plokštelės lenkimas antrosios varžtų eilės lygyje;  $k_{ept}$  – galinės plokštelės lenkimas mazgo tempiamojoje zonoje;  $k_{epc}$  – galinės plokštelės lenkimas mazgo gniuždomojoje zonoje;  $k_{spt(spc)}$  – išilginės plokštelės tempimas ar gniuždymas.



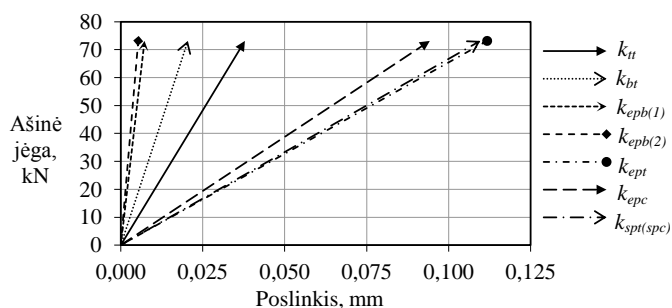
**4.19 pav.** Mazgo 1 komponentų apkrovos ir pailgėjimo (sutrumpėjimo) sąryšiai esant 20 mm storio galinei plokštei

**Fig. 4.19.** Load-deformation curves of components of Joint 1 with back-plate thickness 20 mm



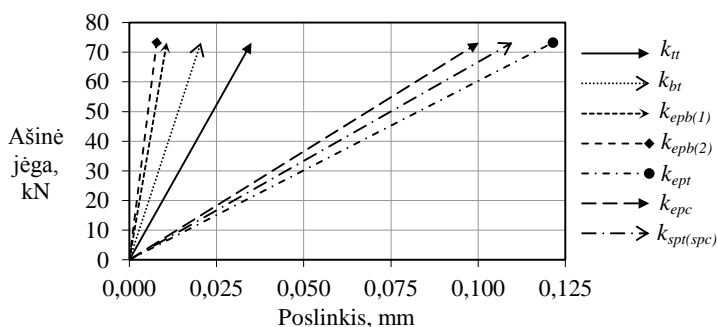
**4.20 pav.** Mazgo 2 komponentų apkrovos ir pailgėjimo (sutrumpėjimo) sąryšiai esant 18 mm storio galinei plokštei

**Fig. 4.20.** Load-deformation curves of components of Joint 2 with back-plate thickness 18 mm



**4.21 pav.** Mazgo 3 komponentų apkrovos ir pailgėjimo (sutrumpėjimo) sąryšiai esant 16 mm storio galinei plokštei

**Fig. 4.21.** Load-deformation curves of components of Joint 3 with back-plate thickness 16 mm

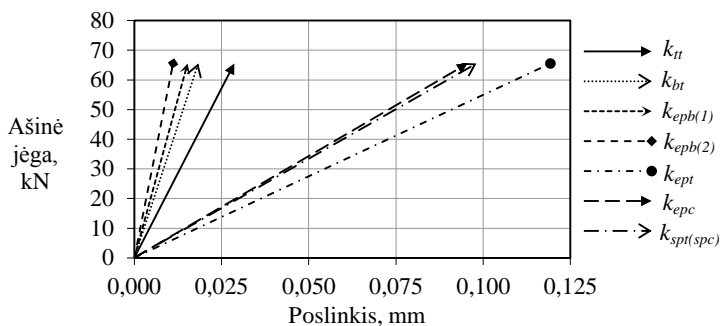


**4.22 pav.** Mazgo 4 komponentų apkrovos ir pailgėjimo (sutrumpėjimo) sąryšiai esant 14 mm storio galinei plokštei

**Fig. 4.22.** Load-deformation curves of components of Joint 4 with back-plate thickness 14 mm

4.19–4.24 paveiksluose vaizduojamas 1–6 mazgų komponentų poveikis sukamajam standžiui, kai keičiamas galinės inkaruojamos plokštelės storis. Iš grafikų matyti, kad didžiausią poveikį mazgo sukamajam standžiui turi galinės plokštelės lenkimas ( $k_{ept}$  ir  $k_{epc}$ ) bei išilginės plokštelės tempimas ar gniuždymas.

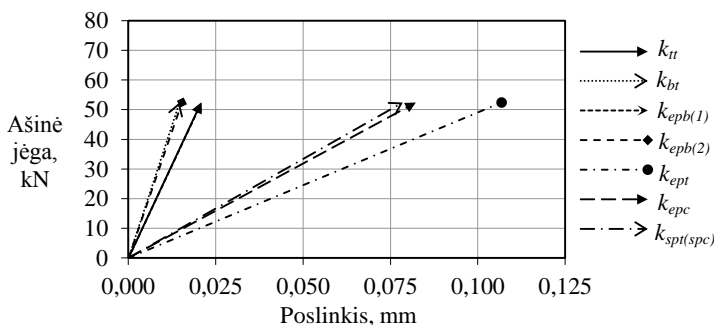
Mažinant galinės plokštelės storį, komponentų poveikis keičiasi, vyraujantis komponentas tampa medienos glemžimas tempiamojoje mazgo zonoje ( $k_{epc}$ ).



**4.23 pav.** Mazgo 5 komponentų apkrovos ir pailgėjimo (sutrumpėjimo) sąryšiai esant 12 mm storio galinei plokštei

**Fig. 4.23.** Load-deformation curves of components of Joint 5 with back-plated thickness 12 mm

4.19–4.24 paveikslai vaizduoja, kaip keičiant mazgo matmenis keičiasi kiekvieno komponento indėlis sukamajam standžiui. Keičiant paminėtus geometrinčius parametrus galima gauti reikiamos lenkiamosios galios ir atitinkamo sukamojo standžio mazgą.



**4.24 pav.** Mazgo 6 komponentų apkrovos ir pailgėjimo (sutrumpėjimo) sąryšiai esant 10 mm storio galinei plokštei

**Fig. 4.24.** Load-deformation curves of components of Joint 6 with back-plate thickness 10 mm

## 4.8. Ketvirtojo skyriaus išvados

1. Nustatyta, kad plieninių konstrukcijų jungtims projektuoti taikomas komponentų metodas gali būti naudojamas analizuojamo mazgo iš medienos ir metalo lenkiamosios galios ir sukamojo standžio skaičiavimuose, papildžius mazgo medienos komponentų laikomosiomis galiomis ir standžio koeficientų išraiškomis.
2. Teorinių skaičiavimų komponentų metodu rezultatus lyginant su eksperimentinių tyrimų bei skaitinio modeliavimo rezultatais, nustatyta kad tiesinė mazgo elgsena gali būti taikoma kai lenkiamasis momentas mazge yra ne didesnis kaip  $2/5M_{j,R}$ . Tiriamam mazgui pasiūlyta jungties tipo koeficiento  $\psi$  reikšmė lygi 1,1 atitinka eksperimentinių tyrimų metu gautąjį lenkiamojo momento ir pasisukimo sąryšį, lenkiamajam momentui viršijus  $2/5M_{j,R}$  reikšmę.
3. Skaičiavimams komponentų metodu patikslinamos kai kurių komponentų standžio koeficientų išraiškos: tempimo ar gniuždymo veikiamos išilginės plokštelės ( $k_{spt}$  ir  $k_{spc}$ ); lenkimo dėl tempimo veikiamos galinės T pavidalo plokštelės ( $k_{ept}$  ir  $k_{epc}$ ) bei naujai pasiūloma tempimo veikiamos medienos standžio koeficiento išraiška ( $k_{tt}$ ).
4. Mazgo stiprumo skaičiavimuose lenkimo dėl gniuždymo veikiamos galinės T pavidalo inkaruojamos plokštelės laikomoji galia  $F_{epc,Rd}$  apimanči ir medienos gniuždymą, gali būti nustatoma remiantis tėjinio galinio elemento gniuždomąja galia  $F_{C,Rd}$ . Tokiu atveju skaičiuotinis mazgo glemžiamasis stipris  $f_{fd}$  prilyginamas medienos gniuždomajam stipriui  $f_{c,d}$ .



5. Lenkiamosios galios ir sukamojo standžio skaičiavimai, atlikti keičiant analizuojamo mazgo matmenis, parodė, kad pagrindiniai komponentai, nulemiantys pradinį sukamąjį standį, yra medienos glemžimas glaudaus sąlyčio su plienine detale srityje ( $k_{epc}$  ir  $k_{ept}$ ) ir išilginės plokštelės tempimas ar gniuždymas ( $k_{spt}$  ir  $k_{spc}$ ). Keičiant mazgo matmenis, keičiasi šių komponentų poveikis. Pavyzdžiui, padidinus inkaruojamos plokštelės ilgį 150 mm, gaunama 56,4 % didesnė lenkiamoji galia, tačiau pradinis sukamasis standis sumažėja apytikriai 19,1 %, kadangi išilginės plokštelės ilgis yra vienas iš labiausiai mazgo sukamąjį standį lemiančių komponentų. Aukščio padidėjimas turi teigiamą poveikį tiek mazgo standžiui, tiek lenkiamajai galiai, todėl padidinus inkaruojamos detalės aukštį 40 mm, gaunama 57,8 % didesnė lenkiamoji galia ir apytikriai 18,5 % didesnis sukamasis standis.



---

## Bendrosios išvados

1. Išanalizavus esamų mazgų iš medienos ir metalo konstrukcinius sprendinius, tyrimams pasiūlytas inovatyvus klijuotosios medienos elementų jungimo mazgas, kuriame mediniai elementai jungiami panaudojant plienines virintines detales. Nustatyta, kad daugumos praktikoje naudojamų mazgų iš medienos ir metalo trūkumas yra pradinis mazgo slankumas, kadangi tarp mazge sąveikaujančių atskirų komponentų nėra užtikrintas pradinis sąlytis. Siekiant eliminuoti tai, siūlomoje jungtyje panaudojamas užpildas, kuris užpildo tarpus tarp medienos ir plieninės detalės. Tyrimų metu buvo naudojami šie užpildai: dviejų komponentų poliuretaninis ir cementinis, kurio sudėtyje yra mikro fibrų, eliminuojančių užpildo susitraukimą.
2. Sudarytas analizuojamo mazgo baigtinių elementų modelis atitinka eksperimentinių tyrimų metu gautą elgseną. Nustatyta, kad sudarytas skaitinis modelis geba fiksuoti tiek staigų irties pobūdį dėl medienos skilimo, tiek tampriai plastinį dėl plieno takumo ar medienos suglemžimo. Skaitiniu modeliavimu gauta mazgo irties forma yra dėl medienos skilimo išilgai pluošto. Ši irties forma atitinka eksperimentinių tyrimų metu gautąją. Tiriant skaitiniu metodu nustatyta, kad skilimas medienoje įvyksta dėl šlyties išilgai ir tempimo skersai medienos pluošto įtempių sąveikos.
3. Mazgų skaitinio modeliavimo baigtinių elementų metodu rezultatai parodė, kad konstrukciniai varžtai medienai apspausti jungties tempiamo-

joje zonoje mazgo sukamajam standžiui poveikio neturi, tačiau labai įtakoja lenkiamąją galią, kadangi analizės metu nenaudojant varžtų medienoje susidaro papildomi tempimo skersai medienos pluošto įtempiai. Nustatyta, kad užpildo tamprumo moduliui esant didesniam nei medienos, baigtinių elementų mazgo modelyje gali būti priimama tiesioginė sąveika tarp medienos ir metalo su trinties koeficientu 0,65.

4. Nustatyta, kad plieninių konstrukcijų mazgų projektavimui taikomas komponentų metodas gali būti naudojamas mazgo lenkiamajai galiai ir sukamajam standžiui skaičiuoti, papildant medienos komponentų stiprio ir standžio išraiškomis. Lenkiamoji galia  $M_{j,R,komp}$  yra 4,8 % mažesnė nei nustatyta eksperimentinių tyrimų metu. Komponentų metodu nustatytas pradinis sukamasis standis  $S_{j,ini,komp}$  yra apytikriai 20,3 % didesnis nei gautas eksperimento metu.
5. Skaičiavimams komponentų metodu patikslinamos kai kurių komponentų standžio koeficientų išraiškos: tempimo ar gniuždymo veikiamos išilginės plokštelės ( $k_{spt}$  ir  $k_{spe}$ ); lenkimo dėl tempimo veikiamos galinės T pavidalo plokštelės ( $k_{ept}$  ir  $k_{epc}$ ) bei naujai pateikiama tempimo veikiamos medienos standžio koeficiento išraiška ( $k_{tt}$ ). Jungties stiprumo skaičiavimuose lenkimo dėl gniuždymo veikiamos galinės T pavidalo inkaruojamos plokštelės laikomoji galia  $F_{epc,Rd}$ , apimanti ir medienos gniuždymą, gali būti nustatoma remiantis tėjinio galinio elemento gniuždomąja galia  $F_{C,Rd}$ . Tokiu atveju skaičiuotinis mazgo glemžiamasis stipris  $f_{jd}$  yra lygus medienos gniuždomajam stipriui  $f_{cd}$ .
6. Teoriniams skaičiavimams komponentų metodu nustatyta riba, iki kurios gali būti naudojama tampri tiesinė mazgo elgsena, tai yra  $2/5M_{j,Rd}$ . Tiriamam mazgui pasiūlyta jungties tipo koeficiento  $\psi$  reikšmė lygi 1,1 atitinka eksperimentinių tyrimų metu gautąjį lenkiamojo momento ir pasisukimo sąryšį, lenkiamajam momentui viršijus  $2/5M_{j,R}$  reikšmę.

---

## Literatūra ir šaltiniai

ABAQUS Manual. *ABAQUS 6.12 Documentation*. 3DS, 2012 Edition.

Aicher, S.; Klock, W. 2001. Linear versus quadratic failure criteria for inplane loaded wood based panels, *Otto Graf Journal* 12: 187–200.

Anderson, T. L. 2005. *Fracture Mechanics Fundamentals and Applications Third edition*. by Taylor and Francis Group, LLC. ISBN 13: 978–1–4200–5821–5.

Awaludin, A.; Smittakorn, W. 2004. Flexural resistance of steel to wood connection with various multiple–bolt configurations, *The 17<sup>th</sup> KKCNN Symposium on Civil Engineering*, 321–326, Ayutthaya, Thailand.

Awaludin, A.; Smittakorn, W.; Hayashikawa, T.; Hirai, T. 2007. M–theta curve of timber connection with various bolt arrangements under monotonic loading, *Journal of Structural Engineering* 53: 853–862.

Bartunkova, E. 2013. Constitutive Model of Timber. *Master Thesis*, Czech Technical University in Prague.

Blas, H. J. 1995. Buckling lengths, *Chapter B7 in: Timber engineering, STEP 1*, Centrum Hout; Almere; Netherlands.

Blas, H. J.; Schadle, P. 2011. Ductility aspects of reinforced and non–reinforced timber joints, *Engineering Structures* 33: 3018–3026.

- Blass, H. J.; Bejtka, I. 2005. Self-tapping screws as reinforcement in connections with dowel-type fasteners, *International Council for Research and Innovation in Building and Construction CIB-W 18/38-7-4*. Karlsruhe, Germany.
- Bouchair, A.; Racher, P.; Bocquet, J. F. 2007. Analysis of dowelled timber to timber moment-resisting joints, *Materials and Structures* 40: 1127–1141.
- Brady, J. F.; Harte, A. M. 2008. Pre stressed FRP flexural strengthening of softwood glue-laminated timber beams, *10<sup>th</sup> World Conference on Timber Engineering*, Miyazaki, Japan.
- Bruehl, F.; Kuhlmann, U.; Jorissen A. 2011. Consideration of plasticity within the design of timber structures due to connection ductility, *Engineering Structures* 33: 3007–3017.
- Chang, W. S.; Hsu, M. F.; Chen, C. J. 2004. Estimating rotational stiffness of timber joints by using fractional factorial experiments combined with computer simulation, *8<sup>th</sup> World Conference on Timber Engineering*, Lahti, Finland.
- Chen, C. J. 1999. Mechanical behavior of fiberglass reinforced timber joints, *PhD Thesis*, Swiss Federal Institute of Technology Lausanne EPFL, Switzerland.
- Chen, C. J.; Lee, T. L.; Jeng, D. S. 2003. Finite element modeling for the mechanical behavior of dowel – type timber joints, *Computers and Structures* 81: 2731–2738.
- Danielsson, H.; Gustafsson, P. J. 2013. A three dimensional plasticity model for perpendicular to grain cohesive fracture in wood, *Engineering Fracture Mechanics* 98: 137–152.
- Daniūnas, A.; Urbonas, K. 2008. Analysis of steel frame with semi-rigid beam-to-beam and beam-to-column knee joints under bending and axial forces, *Engineering Structures* 30: 3114–3118.
- Daniūnas, A.; Urbonas, K. 2010. Influence of the semi-rigid bolted steel joints on the frame behavior, *Journal of Civil Engineering and Management* 16: 237–241.
- Del Savio, A. A.; Nethercot, D. A.; Vellasco, P. C. G. S.; Andrade, S. A. L.; Martha, L. F. 2009. Generalised component-based model for beam-to-column connections including axial versus moment interaction, *Journal of Constructional Steel Research*, 65 (2009) 1876-1895.
- Descamps, T.; Lambion, J.; Laplume, D. 2006. Timber structures: rotational stiffness of carpentry joints, *9<sup>th</sup> World Conference on Timber Engineering 2006 Conference Proceedings*, Portland Oregon State University, Portland.
- Dias, A. M. P. G.; Van de Kuilen, J. W.; Lopes, S.; Cruz, H. 2007. A non-linear 3D FEM model to simulate timber-concrete joints, *Advances in Engineering Software* 38: 522–530.
- Diaz, C.; Marti, P.; Victoria, M.; Querin, O. M. 2011. Review on the modelling of joint behaviour in steel frames, *Journal of Constructional Steel Research*, 67 (2011) 741-758.

- Diaz, J. J.; Nieto, P. J.; Luengas, A. L.; Dominguez, F. J. S.; Hernandez, J. D. 2013. Non-linear numerical analysis of plywood board timber connections by DOE-FEM and full-scale experimental validation, *Engineering Structures* 49: 76–90.
- Dietenberger, M. A.; Green, D. W.; Kretschmann, D. E.; Hernandez, R. et. al. 1999. *Wood Handbook—Wood as an Engineering Material*. U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 463 p.
- Dinwoodie, J. M. 2000. Timber Its nature and behavior. *Second edition*. E and FN Spon 11 New Fetter Lane, London EC4P 4EE.
- Dorn, M. 2012. Investigations on the serviceability limit state of dowel-type timber connections, *PhD Thesis*, Vienna University of Technology, Austria.
- Dorn, M.; de Borst, K.; Eberhardsteiner, J. 2013. Experiments on dowel-type timber connections, *Engineering Structures* 47: 67–80.
- Eberhardsteiner, J. 2002. *Mechanisches Verhalten von Fichtenholz. Experimentelle Bestimmung der biaxialen Festigkeitseigenschaften*. Springer Verlag, Wien New York.
- Ellingsbo, P.; Malo, K. A. 2012. Withdrawal capacity of long self-tapping screws parallel to grain direction, *12<sup>th</sup> World Conference on Timber Engineering 2012 Conference Proceedings*, Auckland, New Zealand.
- Faella, C.; Piluso, V. Rizzano, G. 2000. *Structural steel semirigid connections. Theory, Design and Software*. CRC Press LLC, N. W. Corporate Blvd., Boca Raton, Florida. ISBN 0–8493–7433–2.
- Falk, R. H.; Kretschmann, D. E.; Rammer, D. R.; Ross, R. J.; Wacker, J. P.; Dieterberger, M. A. 2010. *Wood Handbook—Wood as an Engineering Material*. U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 508 p.
- Fleischmann, M.; Mullner, H. W.; Eberhardsteiner, J. 2004. An orthotropic single-surface plasticity model for spruce wood under consideration of knot effects, *Proceedings of the 21<sup>st</sup> Danubia – Adria Symposium on Experimental Methods in Solid Mechanics* 246–247. ISBN: 953–96243–6–3.
- Franke, B. 2008. Zur Bewertung der Tragfähigkeit von Holz unter Verwendung eines photogrammetrischen Messsystems, *PhD Thesis*, Bauhaus-University of Weimar, Germany.
- Gečys, T. 2010. *Plieninių strypų, įklijuotų medienoje, tyrimas ir analizė*. Baigiamasis magistro darbas. Vilniaus Gedimino technikos universitetas. 112 p.
- Guan, Z. W.; Kitamori, A.; Komatsu, K. 2008. Experimental study and finite element modelling of Japanese “Nuki” joints—Part one: Initial stress states subjected to different wedge configurations, *Engineering Structures* 30: 2032–2040.
- Guan, Z. W.; Kitamori, A.; Komatsu, K. 2008. Experimental study and finite element modelling of Japanese “Nuki” joints—Part two: Racking resistance subjected to different wedge configurations, *Engineering Structures* 30: 2041–2049.

Guan, Z. W.; Rodd, P. D. 2001. Hollow steel dowels—a new application in semi-rigid timber connections, *Engineering Structures* 23: 110–119.

Guan, Z. W.; Zhu, E. C. 2009. Finite element modelling of anisotropic elasto-plastic timber composite beams with openings, *Engineering Structures* 31: 394–403.

Guan, Z.; Inoue, M. 2008. Modelling of failure mechanics of locally reinforced timber fasteners, *10<sup>th</sup> World Conference on Timber Engineering*, Miyazaki, Japan.

Gurkšnys, K. 2006. *Kompozitinių medienos–betono sijų ir jungių kūrimas ir bandymai*. Daktaro disertacija. Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Vilnius: Technika. 99 p.

Hattar, C. P.; Cheng, J. J. R. 1995. Development of moment connections in glued–laminated alberta spruce and pine timber. *University of Alberta, Minister of Supply and Services Canada*. ISBN: 0-662-23066-3.

Hill, R. 1948. *A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals*. Proc. Roy. Soc. London, 1948;193:281–297.

<http://ep.espacenet.com> [paskutinį kartą žiūrėta 2012 m. gruodžio 2 d.]

Itagaki, N.; Kambe, W.; Alejandro, B. G.; Ohashi, Y.; Okazaki, Y.; Iijima, Y. 2010. The development of the rigid frame wooden house structure jointed with glued–in hardwood dowels, *11<sup>th</sup> World Conference on Timber Engineering 2010 Conference Proceedings*, Trentino, Italy.

Jasienko, J.; Kardysz, M. 2007. Deformation and strength criteria in assessing mechanical behaviour of joints in historic timber structures, *From Material to Structure–Mechanical Behaviour and Failures of the Timber Structures ICOMOS IWC–XVI International Symposium*, Florence, Venice.

Jensen, J. L.; Nakatini, M.; Quenneville, P.; Walford, B. 2012. A simplified model for withdrawal of screws for end – grain of timber, *Construction and Building Materials* 29: 557–563.

Jensen, J. L.; Quenneville, P.; Nakatini, M. 2010. Withdrawal of lag screws in end-grain, *11<sup>th</sup> World Conference on Timber Engineering 2010 Conference Proceedings*, Trentino, Italy.

Jirka, O.; Mikes, K. 2010. Semi-rigid joints of timber structures, *An International Journal for Engineering and Information Sciences* 5 (2): 19–26.

Johnsson, H. 2004. Plug shear failure in nailed timber connections, Avoiding brittle and promoting ductile failures, *PhD Thesis*, Lulea University of Technology. ISSN 1402–1544.

Jorissen, A.; Fragiaco, M. 2011. General notes on ductility in timber structures, *Engineering Structures* 33: 2987–2997.

Kavaliauskas, S. 2010. *Kompozitinių medinių–betoninių sijų tarpsluoksnių įžambinės medsraigtinės jungties elgsena*. Daktaro disertacija. Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Vilnius: Technika. 144 p. ISBN 978–9955–28–546–5.



Kazuhiro, Y.; Yoshihiro, K.; Masahiro, I. 2010. Proposal of shear strength formula including proportion effects of shear planes, *11<sup>th</sup> World Conference on Timber Engineering 2010 Conference Proceedings*, Trentino, Italy.

Keras, V.; Roličius, J. 2005. In-situ investigation of concentration of strains around an implanted bar, *Journal of Civil Engineering and Management* 11: 39–47.

Kermani, A. 1996. A study of semi – rigid and nonlinear behaviour of nailed joints in timber portal frames, *Journal of Forest Engineering*, 7: 17–33.

Kharouf, N.; McClure, G.; Smith, I. 2003. Elasto–plastic modeling of wood bolted connections, *Computers and Structures* 81: 747–754.

Khorsandnia, N.; Valipour, H. R.; Crews, K. 2013. Nonlinear finite element analysis of timber beams and joints using the layered approach and hypoelastic constitutive law, *Engineering Structures* 46: 606–614.

Kohler, J. 2007. *Reliability of timber structures*. Vdf Hochschulverlag an der ETH Zurich, 241 p. ISBN–978–3–7281–3148–5.

Komatsu, K.; Akagi, M.; Kawai, Mori, T.; Hattori, Sh.; Hosokawa, K. 2008. Improved column–beam joint in glulam semi-rigid portal frame, *10<sup>th</sup> World Conference on Timber Engineering*, Miyazaki, Japan.

Komatsu, K.; Hosokawa, K. 1998. Glulam semi-rigid portal frames composed of hardwood wedges and metal wares, *5<sup>th</sup> World Conference on Timber Engineering* 2: 246–253, Montreux, Switzerland.

Komatsu, K.; Nakashima, Sh.; Kitamori, A. 2012. Development of ductile moment-resisting joint based on a new idea for glulam portal frame structures, *12<sup>th</sup> World Conference on Timber Engineering 2012 Conference Proceedings*, Auckland, New Zealand.

Leijten, A. J. M. 2011. Requirements for moment connections in statically indeterminate timber structures, *Engineering Structures* 33: 3027–3032.

Loferski, J.; Gamalath, S. 1989. Predicting rotational stiffness of nail joints, *Forest products journal* 39(7–8): 8–16.

Loinsigh, C.; Oudjene, M.; Shotton, E.; Pizzi, A.; Fanning, P. 2012. Mechanical behaviour and 3D stress analysis of multi-layered wooden beams made with welded-through wood dowels, *Composite Structures* 94: 313–321.

LST EN 1993 -1 – 8: 2005+AC:2006. *Eurokodas 3. Plieninių konstrukcijų projektavimas. 1 – 8 dalis. Mazgų projektavimas*. Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius, 2007, 134 p.

LST EN 1995–1–1. *Eurokodas 5. Medinių konstrukcijų projektavimas. 1 – 1 dalis. Bendrosios nuostatos. Bendrosios ir pastatų taisyklės*. Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius, 2006, 130 p.

LST EN 26891. *Medinės konstrukcijos. Sujungimai mechaninėmis tvirtinimo detalėmis. Bendrieji mechaninio stiprio ir deformacijų būdingųjų savybių nustatymo principai*. Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius, 2000, 6 p.

- Madhoushi, M.; Ansel, M. P. 2008. Behaviour of timber connections using glued-in GFRP rods under fatigue loading. Part I: In-line beam to beam connections, *Composites Part B: engineering* 39: 243–248.
- Madhoushi, M.; Ansel, M. P. 2008. Behaviour of timber connections using glued-in GFRP rods under fatigue loading. Part II: Moment-resisting connections, *Composites Part B: engineering* 39: 249–257.
- Malo, K. A.; Siem, J.; Ellingsbo, P. 2011. Quantifying ductility in timber structures, *Engineering Structures* 33: 2998–3006.
- Masse, D. I.; Salinas, J. J. 1988. Analysis of timber trusses using semi-rigid joints, *Canadian Agricultural Engineering* 14(2): 183–195.
- Mirianon, F.; Toratti, T.; Fotino, S. 2008. A method to model wood by using Abaqus Finite Element Software-Part 2. Application to dowel type connections. *VTT Technical Research Centre of Finland*, 2008, 55 p.
- Moses, D. M.; Prion, H. G. L. 2004. Stress and failure analysis of wood composites: a new model, *Composites Part B: engineering* 35: 251–261.
- Murty, B.; Asiz, A.; Smith, I. 2011. Tests and models for engineered wood product connections using small steel tube fasteners, *Engineering Structures* 33: 63–68.
- Noguchi, M.; Takino, Sh.; Komatsu, K. 2006. Development of wooden portal frame structures with improved columns, *The Japan Wood Research Society* 52: 51–57.
- Oudjene, M.; Khelifa, M. 2009. Elasto-plastic constitutive law for wood behaviour under compressive loadings, *Construction and Building Materials* 23: 3359–3366.
- Oudjene, M.; Khelifa, M. 2009. Finite element modelling of wooden structures at large deformations and brittle failure prediction, *Materials and Design* 30: 4081–4087.
- Oudjene, M.; Khelifa, M. 2010. Experimental and numerical analyses of single double shear dowel – type timber joints, *11<sup>th</sup> World Conference on Timber Engineering 2010 Conference Proceedings*, Trentino, Italy.
- Pang, S.; Oh, J.; Park, J.; Park, C.; Lee, J. 2011. Moment-carrying capacity of dovetailed mortise and tenon joints with or without beam shoulder, *Journal of Structural Engineering* 137(7): 785–789.
- Parisi, M. A.; Cordie, C. 2010. Mechanical behavior of double – step timber joints, *Construction and Building Materials* 24: 1364–1371.
- Parisi, M. A.; Piazza, M. 2002. Seismic behavior and retrofitting of joints in traditional timber roof structures, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 22: 1183–1191.
- Pedersen, M. U. 2002. *Dowel Type Timber Connections Strength modelling*. Technical University of Denmark. 166 p. ISBN 87-7877-097-1.
- Racher, P. 1995. Moment resisting connections, *Proceedings of Timber Engineering STEP I*, C16/1 – C16/10, Center Hout.

Racher, P.; Bocquet, J. F. 2005. Non-linear analysis of dowelled timber connections: a new approach for embedding modelling, *Electronic Journal of Structural Engineering* 5: 1–9.

Resch, E.; Kaliske, M. 2010. Three-dimensional numerical analyses of load-bearing behavior and failure of multiple double-shear dowel-type connections in timber engineering, *Computers and Structures* 88: 165–177.

Resch, E.; Kaliske, M. 2012. Numerical analysis and design of double-shear dowel-type connections of wood, *Engineering Structures* 41: 234–241.

Rossignon, A.; Espion, B. 2008. Experimental assessment of the pull-out strength of single rods bonded in glulam parallel to the grain, *Holz als Roh- und Werkstoff* 66: 419–432.

Sandhaas, C. 2012. Mechanical behaviour of timber joints with slotted-in steel plates, *PhD Thesis*, Karlsruhe Institute of Technology.

Santos, C. L.; De Jesus, A. M. P.; Morais, J. L.; Lousada, L. P. C. 2009. Quasi-static mechanical behaviour of a double-shear single dowel wood connection, *Construction and Building Materials* 23: 171–182.

Schmidt, J.; Kaliske, M. 2009. Models for numerical failure analysis of wooden structures, *Engineering Structures* 31: 571–579.

Schoenmakers, J. C. M.; Jorissen, A. J. M. 2011. Failure mechanisms of dowel-type fastener connections perpendicular to grain, *Engineering Structures* 33: 3054–3063.

Serrano, E. 2000. Adhesive joints in timber engineering—modelling and testing of fracture properties, *PhD Thesis*, Lund University.

Serrano, E. 2001. Glued-in rods for timber structures—a 3D model and finite element parameter studies, *International Journal of Adhesion and Adhesives* 21: 115–127.

Serrano, E. 2004. A numerical study of the shear-strength—predicting capabilities of test specimens for wood-adhesive bonds, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 24: 23–35.

Shiratori, T.; Leijten, A. J. M.; Komatsu, K. 2009. The structural behaviour of a pre-stressed column-beam connection as an alternative to the traditional timber joint system, *Engineering Structures* 31: 2526–2533.

Shiratori, T.; Leijten, A. J. M.; Komatsu, K. 2011. Optimisation of pre/post-stressed embedment-type timber joint, *Proceedings of the ICE—Structures and Buildings* 164 (2): 91–104.

Sjodin, J. 2008. Strength and moisture aspects of steel-timber dowel joints in glulam structures—an experimental and numerical study, *PhD Thesis*, Linnaeus University.

Statybos techninis reglamentas STR 2.05.07:2005. *Medinių konstrukcijų projektavimas*. Leidykla Rekona: Vilnius, 2005.

Stehn, L.; Bojres, K. 2004. The influence of nail ductility on the load capacity of a glulam truss structure, *Engineering Structures* 26: 809–816.

Steiger, R.; Gehri, E. 2011. Interaction of shear stresses and stresses perpendicular to the grain. International council for research and innovation in building and construction. Working commission W18-Timber structures, Meeting forty-four, Alghero, Italy, August 2011.

Steiniger, M. 2003. Tensile strength and performance of the INDUO-heavy timber connector in combination with structural composite lumber and Douglas fir, *Master's Thesis*, The University of British Columbia, Vancouver, Canada.

Tabarsa, T. 1999. Compression perpendicular-to-grain behaviour of wood, *PhD Thesis*, The University of New Brunswick.

Trautz, M.; Koj, C. 2009. Self-tapping screws as reinforcement for timber structures, *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium, Valencia* 456–467. ISBN 978–84–8363–461–5.

Trepiecinski, T. 2010. 3D elasto-plastic FEM analysis of the sheet drawing of anisotropic steel sheet, *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 10(4): 95–106.

Urbonas, K. 2006. *Plieninių rėminių konstrukcijų pasiduodančių mazgų modeliavimo ir projektavimo metodų kūrimas*. Doktoro disertacija. Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Vilnius: Technika. 113 p.

Urbonas, K.; Daniūnas, A. 2005. Component method extension of steel beam-to-beam and beam – to – column knee joints under bending and axial forces, *Journal of Civil Engineering and Management* 3: 217–224.

Vašek, M. 2006. Timber semi-rigid frame with glued-in rods, *IABSE congress Responding to tomorrow Challenges in Structural Engineering* 120–121, Budapest Hungary.

Vašek, M. 2008. Semi rigid timber frame and space structure connections by glued-in rods, *10<sup>th</sup> World Conference on Timber Engineering*, Miyazaki, Japan.

Vašek, M.; Blažek, J. *Computer modeling of semi-rigid timber frame connections and experimental verification*, SEMC 2007, The third International Conference on Structural Engineering, mechanics and Computation, Cap town, 2007, pp. 645, 646+CD Mill press Science Publishers, Rotterdam, The Netherlands.

Vašek, M.; Vyhnaček, R. 2006. Timber semi rigid frame with glued-in-rods joints, *9<sup>th</sup> World Conference on Timber Engineering 2006 Conference Proceedings*, Portland Oregon State University, Portland.

Villar, J. R.; Guaita, M.; Vidal, P.; Arriaga, F. 2007. Analysis of the stress state at the cogging joints in timber structures, *Biosystems Engineering* 96(1): 79–90.

Wakashima, Y.; Okura, K.; Kyotani, K. 2010. Development of ductile semi-rigid joints with lagscrewbolts and glued-in rods, *11<sup>th</sup> World Conference on Timber Engineering 2010 Conference Proceedings*, Trentino, Italy.

Wald, F.; Mareš, J.; Sokol, Z.; Drdácý, M. 2000. Component method for historical timber joints, v *The Paramount Role of Joints into the Reliable Response of Structures*, NATO Science Series, Series II, Vol. 4, ed. Banitopoulos C.C., Wald, F., Kluwer Academic Publishers, Dordrecht 2000, ISBN 0-7923-6700-6, s. 417–425.

www.basf-cc.lt [paskutinį kartą žiūrėta 2013 m. lapkričio 15 d.]

www.purbond.com [paskutinį kartą žiūrėta 2011 m. liepos 20 d.]

Xu, B. H.; Bouchair, A. Taazount, M.; Vega, E. J. 2009. Numerical and experimental analyses of multiple-dowel steel-to-timber joints in tension perpendicular to grain, *Engineering Structures* 31: 2357–2367.

Xu, B. H.; Bouchair, A.; Racher, P. 2012. Analytical study and finite element modelling of timber connections with glued-in rods in bending, *Construction and Building Materials* 34: 337–345.

Xu, B. H.; Taazount, M.; Bouchair, A.; Racher, P. 2009. Numerical 3D finite element modelling and experimental tests for dowel-type timber joints, *Construction and Building Materials* 23: 3043–3052.

Zhou, T.; Guan, Z. W. 2010. A new approach to obtain embedding strength of double-sided nail plate joints, *11<sup>th</sup> World Conference on Timber Engineering 2010 Conference Proceedings*, Trentino, Italy.

Zhou, T.; Guan, Z. W. 2011. A new approach to obtain flat nail embedding strength of double-sided nail plate joints, *Construction and Building Materials* 25: 598–607.



---

## Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

### Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Gečys, T.; Daniūnas, A.; Bader, T. K.; Wagner, L.; Eberhardsteiner, J. 2015. 3D finite element analysis and experimental investigations of a new type of timber beam-to-beam connection, *Engineering Structures*, 86 (2015) 134–145. (Thomson Reuters Web of Science; IF<sub>2014</sub>=1,838).

Daniūnas, A.; Gečys, T. 2015. Use of component method in the analysis of timber-steel connections, *Gradevinar*, 67 (2015) 11, 1087–1092. (Thomson Reuters Web of Science, IF<sub>2014</sub>=0,202).

Gečys T.; Daniūnas, A. 2014. Experimental investigation of glued laminated timber beam to beam connections, *European International Journal of Science and Technology (EIJST)*. Newcastle: Center for Enhancing Knowledge. ISSN 2304-9693. Vol. 3, no. 7, p. 239–251.

Gečys, T.; Daniūnas, A.; Gurkšnys, K.; Rasiulis, K. 2013. Klijuotosios medienos sijos elementų tarpusavio jungties eksperimentinis tyrimas, *Engineering structures and technologies*. Vilnius: Technika. ISSN 2029-882X. Vol. 5, no. 1, p. 11–19.

Gečys, T.; Gurkšnys, K.; Rasiulis, K. 2011. Jungties tarp įklijuoto plieninio sriegtojo strypo ir medienos elgsenos tyrimas, *Statybinės konstrukcijos ir technologijos*. Vilnius: Technika. ISSN 2029-2317. T. 3, nr. 1, p. 5–15.

**Straipsniai kituose leidiniuose**

Gečys, T.; Daniūnas, A. 2013. Experimental investigation of glued laminated timber beam to beam connections filled with cement based filler. *Procedia Engineering -11<sup>th</sup> International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques, MBMST 2013*;57:320–326.

Gečys, T. 2012. Classification of timber-steel connections and the behaviour of semi rigid joints. *Bauhaus Summer School “Model Validation and Simulation”: graduate courses for structural engineering applications*, 6<sup>th</sup>–17<sup>th</sup> August 2012. Schriftenreihe des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau; Weimar: Verlag der Bauhaus-Universität Weimar. ISBN 9783860685020, p. 263–271.

Gečys, T. 2011. Pusiau standžių medienos – metalo jungčių klasifikacija ir elgsenos apžvalga. *14-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ 2011 metų teminės konferencijos „Statyba“ (2011 m. kovo 23–25 d.) straipsnių rinkinys*. Vilnius: Technika. ISSN 2029-7149, 1–4.



---

# Summary in English

## Introduction

### Formulation of the problem

The most complex and challenging process during the design and analysis of timber structures is the proper design and analysis of timber connections. Traditionally, timber connections are designed using steel plates and welded details. These connections are used to join separate timber elements into integral element. The production capabilities of glued laminated timber elements are wide: straight elements can be up to 40 m long and dimensions of the curved axis elements can exceed all transportation limits. For this reason, mounting connections are inevitable. A review of previously investigated semi-rigid mounting timber connections was performed by consulting the world's patent database [esp@cenet](mailto:esp@cenet) ([www.espacenet.com](http://www.espacenet.com)). There, 96 connections were found, which can be treated as semi-rigid mounting connections, and are able to transmit bending moments, as well as axial and shear forces. In total, four different types of load-transmitting systems from timber to steel may be distinguished: 1) steel plates and dowels, 2) steel rods glued into timber or threaded steel bars screwed into timber, 3) steel gusset plates or wedges, 4) steel plates and large-diameter bolts. The connection investigated in the doctoral thesis may be assigned to the 3<sup>rd</sup> classification which is assembled using welded steel details and filler material used to ensure initial contact between interacting parts of the connection.

Almost all connections in timber structures may be treated as semi-rigid with a certain rotational stiffness. Semi-rigid connections in timber structures are distinguished

because of relative low modulus of elasticity of timber compared to steel and loose initial deformations if analyzing traditional timber connections. The rotational stiffness and moment resistance of the connection can be determined using different methods: laboratory experiments, finite element modeling and theoretical component method. The rotational stiffness of the connection has a strong influence on the distribution of bending moments and displacements of the analyzed frame. Although almost all timber connections should be treated as semi-rigid, neither Lithuanian nor European timber design codes provide any methods for determining the rotational stiffness of the connection. Component method is the commonly used theoretical method for the determination of the moment resistance and rotational stiffness of the connection. This method is widely implemented for H-type semi-rigid steel connections to determine the moment resistance and rotational stiffness. This method combines all components affecting the moment resistance and rotational stiffness of the connection. The component method is not widely used for calculations of semi-rigid timber steel connections. Implementing this method in practical calculations requires the stiffness coefficient equations and bearing capacities of each component.

### **Relevance of the thesis**

The moment resistance and rotational stiffness of the connection may be determined by laboratory experiments or finite element modelling. Since these methods are expensive and very time-consuming, they are not used in practical engineering calculations. In practical calculations the real behaviour of the connection should be evaluated using simpler methods, such as the component method. The component method is not widely implemented in theoretical calculations of semi-rigid timber connections. Previous studies were focused on the simple timber connections where only one active component is excluded. The moment resistance and rotational stiffness of the complex semi-rigid timber steel connections are dependent on several active timber and steel components. The determination of the theoretical moment-rotation curve of the connection, requires the development of the component method for timber-steel connections.

### **The object of the research**

The object of research is the behaviour of the semi-rigid timber-steel connection in terms of bending moment-rotation relation.

### **Aim of the thesis**

The aim of the work is to expand and implement the component method for determining of the moment resistance and rotational stiffness of the glued laminated timber connection.

### **Objectives of the thesis**

The following tasks were solved to achieve the aim of the work:

1. To review the existing semi-rigid timber-steel connections and to analyse methods of analysis.

2. To analyse the possibility of implementing the component method for semi-rigid timber-steel connection by extending the method provided for semi-rigid steel connections.
3. To review the previous studies on the resistance and stiffness coefficients of separate timber and steel components.
4. To determine the moment resistance and rotational stiffness of the connection by full-scale laboratory experiments.
5. To prepare the 3D finite element model of the connection and to determine the moment resistance and rotational stiffness using numerical model.
6. To develop the strength and stiffness equations of separate components and to create the algorithm for determination of the moment resistance and rotational stiffness of the analysed connection.

### **The research methodology**

The following research methods were used in the work: laboratory experiments, finite element modelling, and the component method.

Laboratory experiments were used to determine the moment resistance, tension and compressive deformations in the contact zone and stresses in the timber element.

The 3D finite element model was developed by employing the finite element software ABAQUS.

Theoretical calculations relevant to the analysed timber-steel connection were performed by extending the component method presented for the semi-rigid steel connections. The component method was extended by supplementing equations designed to determine the strength and stiffness of timber components.

### **Scientific novelty of the thesis**

Scientific novelty of the work is represented by the following novel results:

1. The component method used for the semi-rigid steel connections is extended by including the bearing capacities and stiffness coefficients of timber components. The provided component method allows determining the moment resistance and rotational stiffness of the investigated connection.
2. The developed 3D finite element model enables to determine the moment resistance and rotational stiffness of the analysed connection. There is a possibility to identify all the possible failure modes using the presented finite element model: from brittle failure because of timber shear to the steel yielding. The developed finite element model represents the actual behaviour of the connection using different contact conditions between interacting materials. The model combines timber and steel non-linear behaviour.
3. The moment resistance and rotational stiffness of the connection are experimentally determined. The tight contact zone deformations are measured which are used for deriving equations of stiffness coefficients.

### Practical value of the research findings

The experimental and finite element modelling results are used for development of the strength and stiffness equations used in component method. The presented moment resistance and rotational stiffness calculation algorithm based on component method may be used for practical calculations of the connection. Based on the component method the real behaviour of the connection may be evaluated by the theoretically determined moment-rotation curve in the practical calculations.

### Defended statements

1. The component method used for the semi-rigid steel joint design may be used for determining the moment resistance and rotational stiffness of the analysed connection, by including the bearing capacities and stiffness coefficients of timber components.
2. The provided component method calculation algorithm may be used for determining the theoretical bending moment-rotation relation of the connection used for the analysis and design of structures.
3. The presented 3D finite element model of the connection represents the actual behaviour of the connection. The finite element model combines several failure criteria which enable determining most failure modes of the connection, from timber in shear to steel yielding.
4. The filler may be used as a material to fill the gap between timber and steel in the analysed connection.

### The approval of the research findings

8 scientific articles have been published on the topic of this dissertation: two in science journals that have been included in the ISI Web of Science list (Gečys *et al.* 2015, Daniūnas and Gečys 2015); two in scientific journals that have been included in databases approved by the SCL (Gečys *et al.* 2011, 2013); one in other international journal (Gečys and Daniūnas 2014); three in the reviewed material of conferences (Gečys 2011, Gečys, 2012, Gečys and Daniūnas 2013).

The results of research performed in the dissertation were disclosed in three scientific conferences:

- 14<sup>th</sup> Conference of Young scientists “*Science-Lithuanian future*”, Vilnius, 2011;
- International conference “*Model Validation and Simulation*”, Weimar, Germany, 2012;
- International conference “*Modern building materials, structures and techniques*”, Vilnius, 2013.

### Structure of the dissertation

The dissertation consists of the introduction, 4 chapters, general conclusions, a reference list, a list of author's publications, and 2 annexes. The volume of this dissertation is 131 pages, 73 figures, 11 tables and 2 annexes. 119 references have been used.

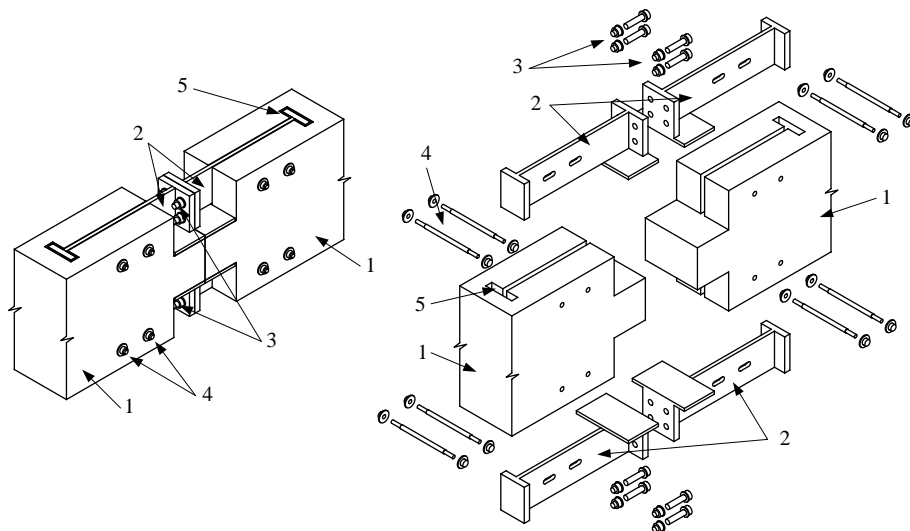
# 1. Design principles of semi-rigid timber-steel connections, methods of analysis and research object

Glued laminated timber is universal structural material widely used in the production of glued laminated timber products (Guan and Rodd 2001). The most complex and challenging process during the design and analysis of timber structures is the proper design and analysis of timber connections. Since the cross-sectional dimensions of the whole structural element are mostly determined by the structure of the connection, rational design has significant economic benefits. The production capabilities of glued laminated timber elements are wide: straight elements can be up to 40 m long and dimensions of the curved axis elements might exceed all transportation limits. For this reason, the structural elements are divided into suitable dimensions for transportation and assembled into integral element on site.

All connections in timber structures are usually treated as pinned or rigid. A more detailed analysis reveals a third group, named semi-rigid connections. The behaviour of semi-rigid connections is characterised by the moment-rotation  $M/\varphi$  curve (Daniūnas and Urbonas 2008, Jirka and Mikes 2010, Awaludin and Smittakorn 2004, Awaludin *et al.* 2007, Chang *et al.* 2004, Daniūnas and Urbonas 2010, Parisi and Cordie 2010, Lofer-ski and Gamalath 1989). The ratio between moment and rotation is expressed by the initial stiffness  $S_{j,ini}$  that is valid for the elastic part of the connection. The moment-rotation curve of the connection can be determined by different methods: laboratory experiments, finite element modelling and the theoretical component method which combines all of the components that influence the rotational stiffness  $S_j$  and moment resistance  $M_{j,Rd}$ .

While searching for the structure of the connection for further analysis, the existing semi-rigid timber-steel connections were reviewed. For this reason, a review of previously investigated semi-rigid timber connections was performed by consulting the world's patent database *espa@cenet* ([www.espacenet.com](http://www.espacenet.com)). There, 96 connections were found, which can be treated as semi-rigid mounting connections and are able to transmit bending moments, as well as axial and shear forces. In total, four different types of load transmitting systems from timber to steel may be distinguished: 1) steel plates and dowels, 2) steel rods glued into timber or threaded steel bars screwed into timber, 3) steel gusset plates or wedges, 4) steel plates and large diameter bolts. The review of the previous researches on each type of load transmitting system is given in this chapter.

After reviewing the different types of connections and analyzing the previous researches, the structure of the semi-rigid timber connection was designed, as shown in Figure S1. The aim of this connection is to link two glued laminated timber (GLT) beams rigidly, with respect to bending moments. Two welded steel parts are embedded and consequently anchored into the GLT elements and fixed by means of steel clamping bolts (holding together the timber side members with the steel plate but not transferring any lateral force) on each side of the connection. The steel elements in the timber beam are designed to be able to transmit tension and compressive forces as well as shear forces from steel elements to the GLT beam.



**Fig. S1.** Semi-rigid timber-steel connection: 1 – timber element, 2 – steel detail, 3 – mounting bolt, 4 – constructive bolts, 5 – tight contact between timber and steel

In order to avoid considerable initial slip due to unavoidable manufacturing tolerances, the gaps between the GLT and steel elements are closed with filler. This is only the case at the T-shaped end of steel plate, while the gaps along the steel plate are empty. During hardening of the filler materials, casting barriers were inserted to ensure that gaps along the steel plate remained open.

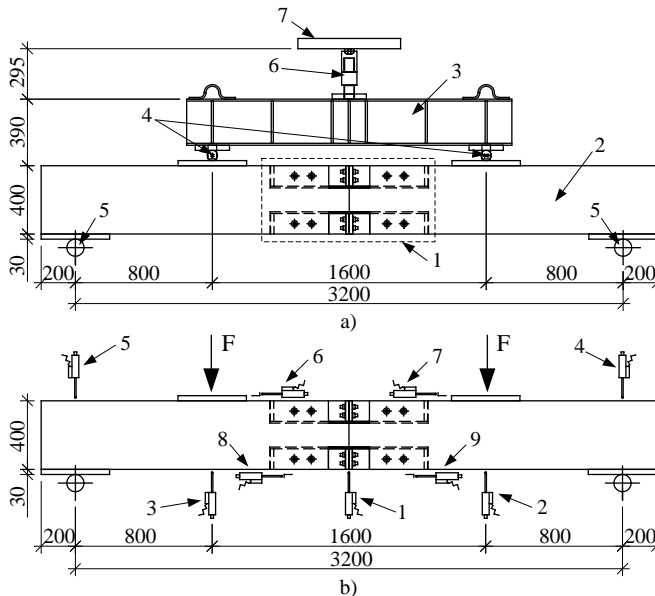
## 2. Laboratory experiments of timber-steel connections

A typical dimension of a glued laminated timber beam was used for the laboratory experiments, with a height of 400 mm and a width of 200 mm. The glued laminated beam was made of strength class GL24h. The length of the 12 mm thick steel part embedded in grain direction (anchoring length) is 315 mm and its height is 120 mm. The steel plate inserted in the timber beam perpendicular to the grain has dimensions of 90 mm in width, 120 mm in height and 20 mm thickness. All steel parts had a strength class S275. Clamping steel-to-timber bolts with a diameter of 12 mm are inserted in pre-drilled holes of 15 mm in diameter. They are designed to clamp the timber but do not transfer loads from the steel part to the timber. For this purpose, also the corresponding holes in the steel parts are larger and oval shaped. For mounting of the connection, i.e. for joining adjacent steel parts, mounting bolts with a diameter of 16 mm are used.

If such a type of timber connection is subjected to global bending, failure may occur in both the timber elements or in the steel parts. In the timber element (position 1 according to the Figure S1), there are three different failure modes: (1) tensile failure of

the remaining cross-section in the lower tension part of the connection, (2) compressive failure of the timber in the contact area of timber and the anchored steel part in the connection's lower and upper zones, and (3) shear failure of the timber, which anchors the steel part into the timber element in case of tension forces. The steel part (position 2 according to the Figure S1) may fail in several ways, including buckling of the longitudinal steel plate in the compression zone, tensile failure of the bolts connecting the steel part and of the steel part itself, and bending of both end plates of the steel elements.

In order to determine the actual behaviour of the connection, full-scale laboratory experiments were performed. The connection was situated in the centre of a glued laminated timber beam tested in four-point bending, as shown in Figure S2. The total span of the glued laminated timber elements was 3.20 m and the connection was designed as described in the previous section.

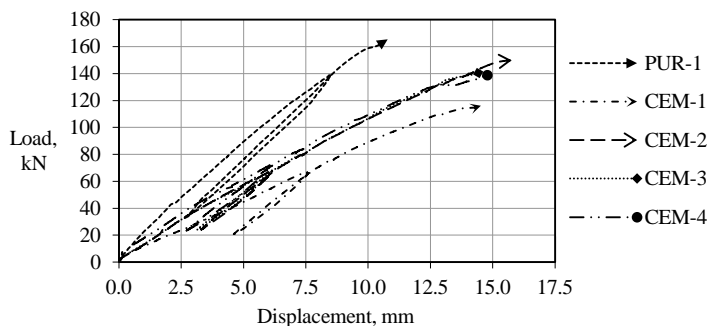


**Fig. S2.** The laboratory testing scheme: a) 1 – connection area, 2 – glued laminated timber element, 3 – cross beam, 4 – load additive points, 5 – pinned supports, 6 – dynamometer, 7 – loading machine plate; b) the layout scheme of displacement indicators

In total five beam-to-beam connections were tested, showing the same geometry. One connection was tested using the two component polyurethane based filler (Purbond CR 421 *Purbond AG*, Sempach, CH) (PUR-1), the other four connections were tested using the cement based filler (Emaco Nanocrete R4, *BASF Construction Chemicals Ltd.*, Manchester, UK), which contains polymer microfibers (CEM-1, CEM-2, CEM-3, CEM-4).

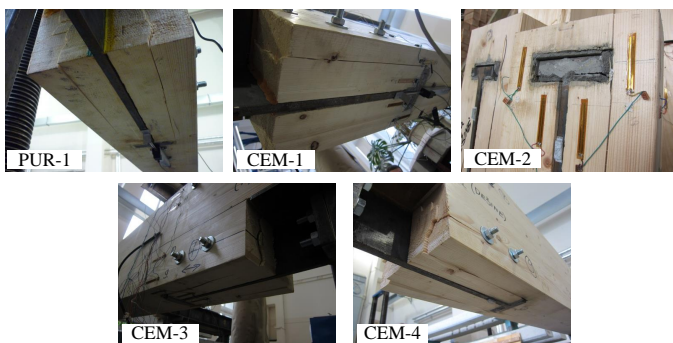
The experiments were performed according to EN26891:2000 (2000). While loading displacements were measured according to the displacement indicator scheme, shown in Figure S2. The Figure S3 shows the load-central point displacement (dis-

placement indicator 1<sup>st</sup> according to Figure S2) curves. These curves represent different behaviour of the connections using different filler materials.



**Fig. S3.** Load-central point displacement curve

The experimental collapse form was timber shear in the tension zone. The Figure S4 clearly shows the straight lines of the timber shear planes in the tension zone of the connection. These shear planes are the same as for the theoretical assumptions. The experimentally determined moment resistances and rotational stiffness of all specimens are explained in detail in the thesis.



**Fig. S4.** The experimental collapse form: timber shear in the tension zone of the connection

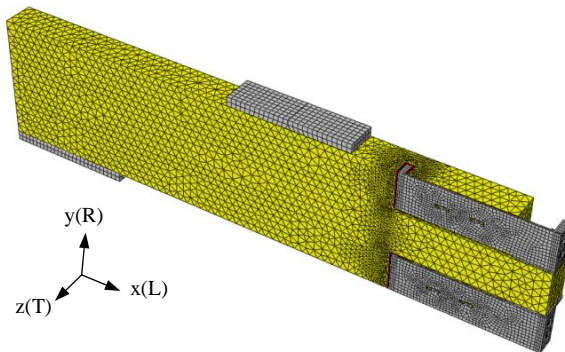
### 3. Finite element analysis of the semi-rigid connection

To simulate the behaviour of the beam-to-beam connection, FE analyses are performed, using commercial finite element software. A four-point bending test was simulated with a free span of 3.20 m, which corresponds to experimental investigations. The FE model of the connection is shown in Figure S5, where the mesh of all analysed parts is depicted. The structure of the connection is symmetric with respect to the  $y$ - $z$  and  $x$ - $y$  planes. In order to save calcula-



tion time, the FE model is reduced to one quarter of the whole connection. Timber is modelled using 4-noded linear tetrahedron elements and an elastic-perfectly plastic material behaviour without hardening or softening. Steel plates, steel bolts and filler were modelled using 8-noded linear brick elements with reduced integration and using different isotropic elastic plastic material behaviour for steel parts and steel bolts. Different isotropic elastic properties of the different filler materials are used. Clamping and mounting bolts and their respective nuts and washers were modelled as one part each. The clamping bolts were modelled not being subjected to pre-stress, i.e. no pressure was applied to the timber – only a tie constraint enforced between timber and clamping bolts during the analysis. The timber beam and steel part were in contact in the region of the T-shaped end plates only; all other parts had gaps of 1.5–10 mm between timber and steel, which remained open during the analysis. The load application was performed using load distribution plates, which were also used for the support.

The material behaviour of timber is assumed to be orthotropic. Therefore, in the FE model, timber is simulated as orthotropic elastic-perfectly plastic material. The values which are used in the finite element modelling are given in the thesis.



**Fig. S5.** The 3D finite element model of the timber-steel connection

To evaluate the nonlinear behaviour of timber, a combination of two failure criteria is used. While the Hill failure criterion is applied to capture yielding upon compression along and perpendicular to the grain, surface based cohesive behaviour is used to depict the brittle failure upon tension perpendicular to the grain and shear. For the elastic-plastic behaviour of wood, the potential function of the Hill criterion which is an extended form of the von Mises criterion (Hill 1948, Abaqus documentation 2012).

There are three possible fracture modes in the defined surfaces. In timber these fracture modes are caused by: tensile stresses perpendicular to the grain (mode I), shear stresses acting parallel to the grain (mode II), and shear stresses acting out-of-plane of the grain direction (mode III). Fracture may occur from each of these three modes as well as from combinations of these. In order to account for the stress interaction, a quadratic stress criterion is used and also maximum stress criterion, to describe the damage initiation, reading as (Steiger and Gehri 2011, Aicher and Klock 2001):

$$\left(\frac{\sigma_{t,90}}{f_{t,90}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_v}{f_v}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{v,90}}{f_{v,90}}\right)^2 = 1.0, \quad (S1)$$

$$\max\left\{\frac{\sigma_{t,90}}{f_{t,90}}, \frac{\tau_v}{f_v}, \frac{\tau_{v,90}}{f_{v,90}}\right\} = 1.0, \quad (S2)$$

where  $\sigma_{t,90}$  is the tensile stress perpendicular to the grain,  $\tau_v$  is the shear stress parallel to the grain,  $\tau_{v,90}$  is the rolling shear stress, and  $f_{t,90}$ ,  $f_v$  and  $f_{v,90}$  are the corresponding strengths.

The application of the displacement driven load to the timber beam as well as the support of the timber beam both use steel load distribution plate, with the same material properties like the steel plates of the connection.

For the purpose of the development of a realistic numerical model for the behaviour of the connection under bending, the influence of different model assumptions are studied in addition to the influence of filler, as summarized in table S1.

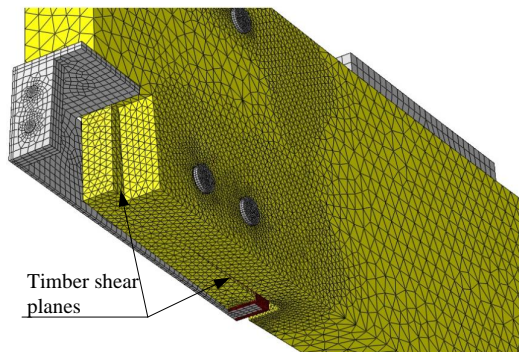
**Table S1.** Overview of the different finite element models

Model name	Filler in the model	Clamping bolts	Surface tie timber-steel part	Surface tie timber-filler; surface to surface filler-steel part	Material properties of timber
LS-CB	None	X	X		LS (CEM)
LS	None		X		LS (CEM)
HS-CB	None	X	X		HS (PUR)
HS	None		X		HS (PUR)
LS-CEM-CB	CEM	X		X	LS (CEM)
LS-CEM	CEM			X	LS (CEM)
HS-PUR-CB	PUR	X		X	HS (PUR)
HS-PUR	PUR			X	HS (PUR)
LS-PUR-CB	PUR	X		X	LS (CEM)
LS-PUR	PUR			X	LS (CEM)

Table S1 summarizes different finite element models of the connection. Therefore, different numerical models were analysed using different filler materials (CEM and PUR) and no filler at all. Since different compression strength properties of GLT were measured in the tests, this effect is assumed in the model by calculations using low strength (LS) and high strength (HS) properties. In addition, different contact definitions between timber, steel and filler were considered. The effect of the clamping bolts (CB) was also investigated by excluding them from the analysis. The investigated models can

be summarized into two groups: the first group of models which does not consider filler material, i.e. there is direct contact between timber and steel; the second group of models is analysed considering filler material in the FE models.

The decisive failure mode, observed during the experiments, could be reproduced by the FE models (Figure S6). The shear failure occurred in the pre-defined fracture surface where surface based cohesive contact was defined. Total failure of the connection was assumed when the fracture criterion in equations S1 and S2 reached the value of 1.0 in the whole surface, i.e. the cohesive contact had fully opened.



**Fig. S6.** The failure mode of the connection using finite element method: timber shear in the tension zone of the connection

Several influence factors on the global behaviour of the connection were investigated. Including clamping bolts in the analysis led to an overestimation of the strength of the connection. Including the filler materials in the FE analysis led to different local contact behaviour as well as to a different global response. Using a stiff filler material (CEM) had almost no influence both on the local and global behaviour. A softer filler material (PUR) leads to weaker global behaviour of the connection, which is not obvious from experimental data, since the corresponding timber beams had comparably higher strength. However, using FE analyses with uniform timber strengths allowed studying this effect. Moreover, it could be shown that in the models using filler material, the early onset of plasticity in the timber is avoided since stress peaks are reduced. This can influence failure surface, along which the anchoring timber block splits off.

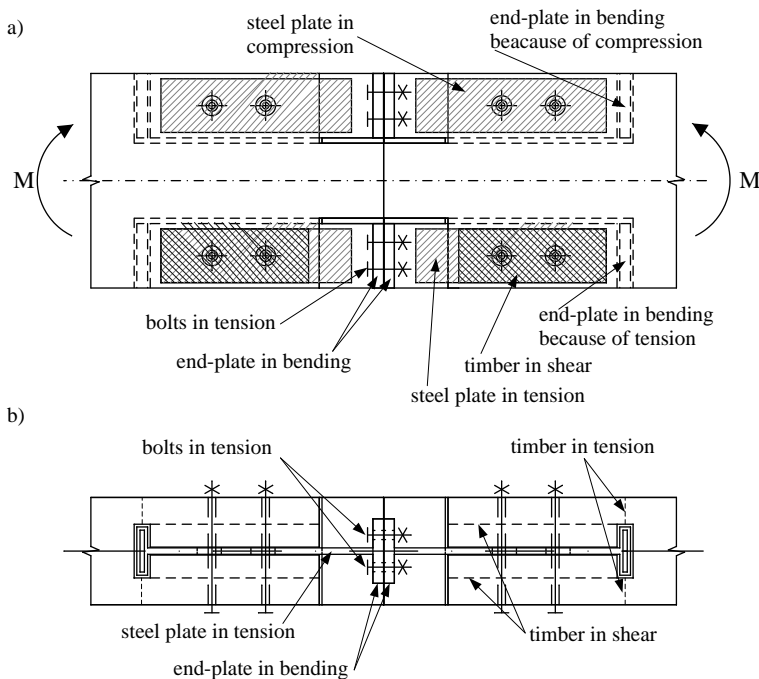
#### 4. Modelling of strength and stiffness of semi-rigid timber-steel connection using the component method

The moment resistance  $M_{j,Rd}$  and initial rotational stiffness  $S_{j,ini}$  of the analysed connection depend on the several active components of the connection. Figure S7 shows the active components which influence the moment resistance and rotational stiffness.

The steel part components are determined based on the equations provided in the LST EN 1993-1-8. Some of these equations are transformed for evaluation of the interaction between steel and timber, instead of steel to concrete. All the further provided equations are validated by laboratory experiments and finite element modelling.

The active components for the analysed connection are:

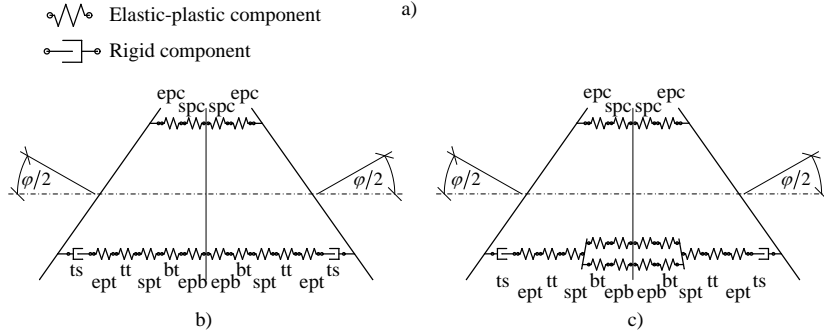
- end-plate in bending in the tension zone of the connection (*epb*);
- bolts in tension (*bt*);
- steel plate in tension (*spt*);
- end-plate in bending caused by the tension, including timber compression in the tension zone of the connection (*ept*);
- timber in tension (*tt*);
- timber in shear in the tension zone of the connection (*ts*);
- steel plate in compression (*spc*);
- end-plate in bending caused by the compression, including timber compression in the compressive zone of the connection (*epc*).



**Fig. S7.** Active components of the analysed timber-steel connection: a) side view, b) the view from above in the tension zone of the connection

Two different components may be distinguished according to the behaviour, elastic-plastic which influence both moment resistance and rotational stiffness and rigid

which does influence only moment resistance. The mechanical model of the connection is shown in Figure S8.



**Fig. S8.** Mechanical model of the connection: a) front view of the connection, b) models with one tension bolt row, c) model with two tension bolt rows

The design moment resistance of the connection  $M_{j,Rd}$  is determined according to LST EN 1993-1-8 (2005):

$$M_{j,Rd} = \sum_{i=1}^{n_r} h_r \cdot F_{tr,Rd}, \quad (S3)$$

where  $F_{tr,Rd}$  is the effective design resistance of bolt-row  $r$ ;  $h_r$  is the distance from bolt-row  $r$  to the centre of compression;  $r$  is the bolt-row number.

For the connection with one tension bolt-row, the effective design resistance of bolt-row is equal to the minimum component resistance of the row  $F_{t,Rd}$ :

$$F_{t,Rd} = \min \{ F_{epc,Rd}; F_{spc,Rd}; F_{epb,Rd}; F_{spt,Rd}; F_{ept,Rd}; F_{ts,Rd}; F_{tt,Rd} \}. \quad (S4)$$

When in the tension zone of the connection there is more than one tension bolt-row, the effective design resistance  $F_{t,Rd}$  for each bolt-row should be determined in sequence, starting from bolt-row 1 (the bolt-row farthest from the centre of compression), then progressing to the bolt-row 2. When determining the value of  $F_{tr,Rd}$  for the bolt-row  $r$  the effective design tension resistance of all other bolt-rows closer to the centre of compression should be ignored. In equations S5–S9 the indices are the following: (1) – the design tension resistance of the 1<sup>st</sup> bolt-row, farthest from the centre of compression analysing as separate bolt-row; (2) – the design tension resistance of the 2<sup>nd</sup> bolt-row analysing as separate bolt row; (2+1) – the design tension resistance of the 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> bolt rows, analysing these bolt-rows as part of the bolt group.

The design tension resistance of the first bolt-row (farthest from the centre of compression) is determined according to the following equation:

$$F_{t1,Rd} = \min \{ F_{epc,Rd}; F_{spc,Rd}; F_{epb,Rd(1)}; F_{spt,Rd(1)}; F_{ept,Rd}; F_{ts,Rd}; F_{tt,Rd} \}. \quad (S5)$$

The design tension resistance of the second bolt row analysing as separate bolt-row and as a part of bolt-row group with first bolt-row, is determined according to the equation:

$$F_{t2,Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} F_{epc,Rd} - F_{t1,Rd}; F_{spc,Rd} - F_{t1,Rd}; F_{epb,Rd(2)}; \\ F_{epb,Rd(2+1)} - F_{t1,Rd}; F_{spt,Rd} - F_{t1,Rd}; F_{ept,Rd} - \\ F_{t1,Rd}; F_{ts,Rd} - F_{t1,Rd}; F_{tt,Rd} - F_{t1,Rd} \end{array} \right\}. \quad (S6)$$

If analysing connections with more than two bolt rows in the tension zone of the connection, the design tension resistance of the  $i$  bolt-row is determined as minimum value from equations:

$$F_{ti,Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} F_{epc,Rd} - \sum_{j=1}^{i-1} F_{tj,Rd}; F_{spc,Rd} - \sum_{j=1}^{i-1} F_{tj,Rd}; F_{spt,Rd} - \sum_{j=1}^{i-1} F_{tj,Rd}; \\ F_{ept,Rd} - \sum_{j=1}^{i-1} F_{tj,Rd}; F_{ts,Rd} - \sum_{j=1}^{i-1} F_{tj,Rd}; F_{tt,Rd} - \sum_{j=1}^{i-1} F_{tj,Rd} \end{array} \right\}, \quad (S7)$$

$$F_{ti,Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} F_{epb,Rd(i)}; F_{epb,Rd(i+(i-1))} - F_{t(i-1),Rd}; \\ F_{epb,Rd(i+(i-1)+...+1)} - \sum_{j=1}^{i-1} F_{tj,Rd} \end{array} \right\}, \quad (S8)$$

$$F_{ti,Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} F_{spt,Rd(i)}; F_{spt,Rd(i+(i-1))} - F_{t(i-1),Rd}; \\ F_{spt,Rd(i+(i-1)+...+1)} - \sum_{j=1}^{i-1} F_{tj,Rd} \end{array} \right\}. \quad (S9)$$

The resistance of each component is explained in detail in the doctoral thesis.

The rotational stiffness  $S_j$  of the analysed connection is determined according LST EN 1993-1-8 (2005):

$$S_j = \frac{E \cdot z^2}{\mu \cdot \sum \frac{1}{k_i}}. \quad (S10)$$

The equation S10 may be transformed for the connection where there are several different interacting materials:

$$S_j = \frac{z^2}{\mu \cdot \sum \frac{1}{E_i \cdot k_i}}, \quad (S11)$$

where  $k_i$  is the stiffness coefficient for basic joints component  $i$ ;  $z$  is the lever arm;  $\mu$  is the stiffness ratio  $S_{j,ini}/S_j$ .

For the end-plate connections with two or more bolt-rows in tension, the basic components related to all of these bolt-rows should be represented by a single equivalent stiffness coefficient  $k_{eq}$  determined by LST EN 1993-1-8 (2005):

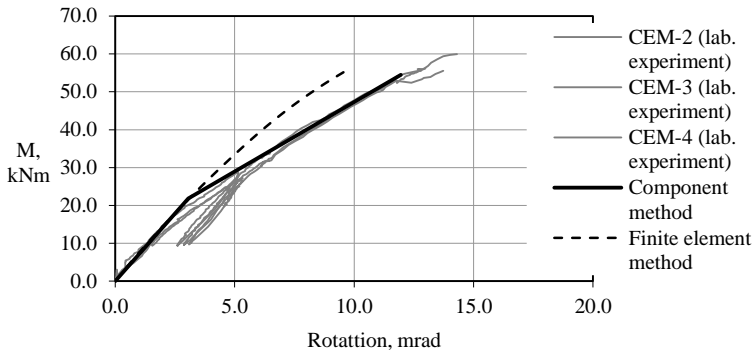
$$k_{eq} = \frac{\sum_r k_{eff,r} \cdot h_r}{z_{eq}}, \quad (S12)$$

where  $h_r$  is the distance between bolt-row  $r$  and the centre of compression;  $k_{eff,r}$  is the effective stiffness coefficient for bolt-row  $r$ ;  $z_{eq}$  is the equivalent lever arm, which is determined by:

$$z_{eq} = \frac{\sum_r k_{eff,r} \cdot h_r^2}{\sum_r k_{eff,r} \cdot h_r}. \quad (S13)$$

Determination of each active component's stiffness coefficient is shown in detail in the doctoral thesis. Equations are derived using the laboratory and finite element modelling results.

Theoretically determined moment resistance of the connection using the presented component method is  $M_{j,R,komp} = 54,5$  kNm. The theoretical failure mode is timber shear in the tension zone of the connection. The rotational stiffness determined using component method is  $S_{j,ini,komp} = 7120$  kNm/rad. When the initial rotational stiffness and moment resistance are determined, the rotational stiffness  $S_{j,komp}$  should be calculated. For this reason, the coefficient  $\psi$  and the elastic range of the connection should be determined. As the Figure S9 shows, the coefficient  $\psi = 1.1$  and elastic range equal to  $2/5 M_{j,Rd}$  clearly represent the actual behaviour of the connection comparing moment-rotation curves with the experimental and finite element modelling, determined. These values are smaller than for the semi-rigid steel connections.



**Fig. S9.** The moment-rotation curves for the analysed connection: experimental (CEM-2, CEM-3, CEM-4); component method and finite element modelling

Table S2 shows the comparison of the experimental, finite element modelling and component method calculation results.

**Table S2.** The comparison of the component method, laboratory and finite element modelling results

Determination method	Moment resistance, kNm	Initial rotational stiffness, kNm/rad
Laboratory experiment	$M_{j,R,exp} = 57.23$	$S_{j,ini,exp} = 5615$
Component method	$M_{j,R,komp} = 54.50$	$S_{j,ini,komp} = 7120$
Finite element modelling	$M_{j,R,FEM} = 55.75$	$S_{j,ini,FEM} = 7027$

The theoretically determined (component method) initial stiffness  $S_{j,ini,komp}$  is 20.3% greater than the laboratory experimental  $S_{j,ini,exp}$ . This difference is only in the elastic range, when the moment value exceeds the value  $2/5M_{j,Rd}$ , the theoretically determined moment-rotation curve reasonably represent the actual behaviour of the connection. The component method determined moment resistance  $M_{j,R,komp}$  is 4.8% smaller than the experimental.

## General conclusions

1. The structure of the further investigated timber-steel connection is proposed after reviewing the existing timber-steel connections. The connection is composed of glued laminated timber element and welded steel details which are anchored into timber element. It was found that the main problem of timber-steel connection is the initial slip while timber and steel components are not in tight contact before loading. With an aim to solve this, the filler material is used to fill the gap between timber element and steel detail. Two different filler materials were used: two-component polyurethane and cement based.
2. The developed 3D finite element model represents the actual behaviour of the analysed connection. It is determined that the finite element model is able to determine most failure modes of the connection, from brittle failure caused by timber shear, to steel yielding. The collapse form of the numerical model of the connection is timber shear which repeats the laboratory experiments. Finite element modelling results show that timber shear is caused by the combination between timber shear and tension perpendicular to the grain stresses.
3. The finite element modelling results show that bolts for timber clamping do not influence the rotational stiffness of the connection. These bolts have high influence on the moment resistance while higher tension stresses in the shear block arise for the models without bolts for clamping. It is determined if the modulus of elasticity of the filler material is higher than the timber, the direct contact between timber and steel may be applied with friction coefficient  $\mu = 0.65$ .



4. The extended component method may be used for the theoretical analysis of investigated timber-steel connection by extending it with stiffness coefficients and bearing capacities of timber components. The moment resistance  $M_{j,R,komp}$  is 4.8% smaller than the experimentally determined. The initial rotational stiffness  $S_{j,ini,komp}$  is 20.3% higher comparing with the experimental results.
5. Some equations of stiffness coefficients are specified: steel plate in tension or compression ( $k_{spt}$  and  $k_{spc}$ ), bending of the T shaped end-plate caused by the tension ( $k_{ept}$  and  $k_{epc}$ ) and newly presented timber in tension stiffness coefficient ( $k_{tt}$ ). The design resistance of the end-plate in compression ( $F_{epc,Rd}$ ) (including timber in compression) may be determined using the design compression resistance of a T-stub flange ( $F_{C,Rd}$ ) equation by changing the design bearing strength of the joint  $f_{jb}$  with timber compressive strength  $f_{c,d}$ .
6. The elastic range of analysed connection is up to the value  $2/5M_{j,Rd}$ . The proposed value of the joint coefficient  $\psi = 1,10$  reasonably represent the behaviour of the connection in elastic range, when bending moment value is above  $2/5M_{j,Rd}$ .



---

## Priedai<sup>\*</sup>

**A priedas.** Bendraautorių sutikimai teikti publikacijose skelbtą medžiagą mokslo daktaro disertacijoje

**B priedas.** Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos

---

<sup>1</sup> Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.

Tomas GEČYS

PUSIAU STANDŽIŲ MAZGŲ  
IŠ MEDIENOS IR METALO  
ELGSENOS TYRIMAS IR  
MODELIAVIMAS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,  
statybos inžinerija (02T)

BEHAVIOUR INVESTIGATION  
AND MODELLING OF THE  
SEMI-RIGID TIMBER-STEEL  
CONNECTIONS

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,  
Civil Engineering (02T)

2016 03 18. 12,25 sp. l. Tiražas 20 egz.  
Vilniaus Gedimino technikos universiteto leidykla „Technika“,  
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,  
<http://leidykla.vgtu.lt>  
Spausdino UAB „BMK leidykla“  
J. Jasinskio g. 16, 01112 Vilnius